



Miguel Barreto Pontes

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

# Efeito da presença de água na estabilidade global de cortinas mono-ancoradas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre  
em Engenharia Civil - Perfil de Geotecnia

Orientador: Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra,  
Professor Associado, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Professora Doutora Maria Paulina Santos Forte de Faria Rodrigues  
Arguente: Professor Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão  
Vogal: Professor Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro de 2016



## **Efeito da presença da água na estabilidade global de cortinas mono-ancoradas**

Copyright © Miguel Barreto Pontes, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.





# Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador científico Professor Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra, por toda a atenção, disponibilidade e simpatia com que sempre me ajudou, que em conjunto com o seu enorme conhecimento foram fundamentais para a concretização deste trabalho. Foi sem dúvida alguma ao longo do meu percurso académico, nomeadamente nas cadeiras de Geotecnia, uma fonte de inspiração por toda a sua exigência e qualidade de ensino, para que eu escolhesse esta área igualmente.

À Professora Cláudia Josefino, por toda a disponibilidade e ajuda prestada sempre que necessário.

Aos meus amigos e colegas de curso, em especial ao Pedro Guerra, que me acompanharam ao longo do meu percurso académico, por todo o seu apoio, compreensão e ajuda.

À minha família, por toda a motivação e apoio prestados, com um especial agradecimento ao meu pai, que infelizmente não irá assistir ao concluir desta dissertação, mas sempre foi o primeiro a me ajudar em toda a minha vida e percurso académico.

E por fim, à minha namorada Sofia, que tanta paciência teve e por ter sido sempre uma pedra basilar ao me apoiar, ajudar e incentivar ao longo da conclusão deste trabalho.



# Resumo

Um dos aspetos mais importantes a ter em conta no pré-dimensionamento de cortinas de contenção mono-ancoradas é a estabilidade global da estrutura. O equilíbrio é garantido pelo binómio altura enterrada/força na ancoragem, sendo que estas são altamente dependentes do nível freático considerado, sendo portanto muito relevante a presença de água. O presente trabalho tem como objetivo principal estudar qual o efeito que a qual poderá ter na estabilidade das cortinas flexíveis mono-ancoradas. No início é feita uma breve análise a esta temática com base no publicado na bibliografia. Recorre-se ainda à análise tensão-deformação, por elementos finitos, para o estudo de um caso base, comparando-se diversos cenários distintos onde se consideram variados níveis freáticos e a existência, ou não, de percolação. A partir deste caso de estudo, desenvolve-se então uma série de análises paramétricas incidindo sobre aspetos estruturais, mecânicos e geométricos. São analisados ainda os resultados obtidos e são tiradas conclusões.

Palavras-chave: ancoragens, altura enterrada, estabilidade, deslocamentos, percolação.



# Abstract

One of the most important aspects in the design of single anchored retaining walls is the global stability of the structure. Is guaranteed by the embeded depth of the wall and the force of the anchor level, and both are very dependent of the freatic level considered. This work has the main objective of studying the effectof the presence of water in soil on the stability of single anchored flexible retaining walls. In the beggining a short analysis of the problem based on published information is performed. A stress-strain finite element analysis program is used, to analyze a case study, comparing different scenarios with various freatic levels and the existence, or not, of seepage. Based on this case study, a parametric analysis is performed, studying structural, mechanical and geometrical parameters. Conclusions from the study are drawn and presented.

Keywords: anchors, embeded depth, global stability, displacements, seepage.



# Conteúdo

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Lista de Figuras</b>                                   | <b>x</b>  |
| <b>Lista de Tabelas</b>                                   | <b>xi</b> |
| <b>Lista de Acrónimos, Abreviaturas e Símbolos</b>        | <b>xv</b> |
| <b>1 Introdução</b>                                       | <b>1</b>  |
| <b>2 Colocação do problema</b>                            | <b>3</b>  |
| 2.1 Estruturas de contenção flexíveis . . . . .           | 3         |
| 2.2 Métodos de estabilidade global em cortinas . . . . .  | 4         |
| 2.3 Cálculo de cortinas com percolação . . . . .          | 7         |
| 2.4 Redução dos parâmetros $c'$ e $\phi'$ . . . . .       | 7         |
| <b>3 Caso base</b>  | <b>9</b>  |
| 3.1 Introdução . . . . .                                  | 9         |
| 3.2 Geometria da cortina . . . . .                        | 9         |
| 3.3 Modelo numérico . . . . .                             | 12        |
| 3.4 Características mecânicas . . . . .                   | 12        |
| 3.5 Programa de cálculo usado . . . . .                   | 15        |
| 3.6 Análise de resultados - Modelos A, B, C e D . . . . . | 16        |
| 3.6.1 Esforços nas ancoragens . . . . .                   | 16        |
| 3.6.2 Deslocamentos totais . . . . .                      | 17        |
| 3.6.3 Deslocamentos verticais . . . . .                   | 17        |
| 3.6.4 Deslocamentos horizontais . . . . .                 | 17        |
| 3.7 Análise de resultados - Modelo D . . . . .            | 18        |
| 3.7.1 Carga Hidráulica . . . . .                          | 18        |
| 3.7.2 Tensões de corte . . . . .                          | 18        |
| 3.7.3 Deslocamentos verticais . . . . .                   | 21        |
| 3.7.4 Deslocamentos horizontais . . . . .                 | 21        |
| 3.8 Análise da influência do comprimento livre . . . . .  | 24        |
| <b>4 Estudo paramétrico</b>                               | <b>29</b> |
| 4.1 Introdução . . . . .                                  | 29        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.2      | Estudo da influência da inclinação da ancoragem . . . . .                                      | 29        |
| 4.3      | Estudo da influência da posição da cabeça da ancoragem . . . . .                               | 32        |
| 4.4      | Estudo da influência do comprimento de selagem . . . . .                                       | 34        |
| 4.5      | Estudo da influência da altura enterrada da cortina . . . . .                                  | 36        |
| 4.6      | Estudo da influência do ângulo de resistência ao corte . . . . .                               | 39        |
| 4.6.1    | Estudo da influência do ângulo de resistência ao corte alterando o valor da<br>ficha . . . . . | 39        |
| 4.6.2    | Estudo da influência do ângulo de resistência ao corte mantendo o valor<br>da ficha . . . . .  | 42        |
| <b>5</b> | <b>Considerações finais</b>  | <b>45</b> |
| 5.1      | Conclusões . . . . .   | 45        |
| 5.2      | Desenvolvimentos futuros . . . . .   | 46        |
|          | <b>Bibliografia</b>  | <b>47</b> |



# Lista de Figuras

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Tipos de estruturas de suporte rígidas (Guerra, 2003) . . . . .  | 3  |
| 2.2  | Método do apoio móvel (Guerra, 2003) . . . . .   | 4  |
| 2.3  | Geometria de uma cortina mono-apoiada (Josefino, 2014) . . . . .   | 5  |
| 2.4  | Representação das forças envolvidas no método de Broms (à esquerda) e no método de Kranz (à direita). (Josefino, 2014) . . . . .             | 6  |
| 3.1  | Esquema do modelo base usado . . . . .   | 10 |
| 3.2  | Modelos do caso base - variação do nível freático . . . . .  | 11 |
| 3.3  | Faseamento construtivo do modelo base . . . . .  | 13 |
| 3.4  | Exemplo de malha de elementos finitos utilizada . . . . .  | 15 |
| 3.5  | Deslocamentos totais, verticais e horizontais na fase de redução dos parâmetros $c'$ e $\phi'$ . . . . .                                     | 19 |
| 3.6  | Carga hidráulica do Modelo D . . . . .   | 19 |
| 3.7  | Tensões de corte relativas das várias fases do Modelo D . . . . .  | 20 |
| 3.8  | Deslocamentos verticais das várias fases do Modelo D . . . . .   | 22 |
| 3.9  | Deslocamentos horizontais das várias fases do modelo D . . . . .   | 23 |
| 3.10 | Variação do ângulo de resistência ao corte de colapso dos vários modelos com o comprimento livre . . . . .                                   | 25 |
| 3.11 | Variação do ângulo de resistência ao corte de colapso dos vários modelos com o fator de comprimento livre/ficha . . . . .                    | 26 |
| 3.12 | Variação do ângulo de resistência ao corte de colapso dos vários modelos com o fator de comprimento livre + selagem/ficha . . . . .          | 27 |
| 3.13 | Deslocamentos totais, na fase de redução dos parâmetros $c'$ e $\phi'$ , para os modelos A e B . . . . .                                     | 28 |
| 4.1  | Variação do comprimento livre com ângulo de resistência ao corte no colapso, para as diversas inclinações de ancoragem do Modelo D . . . . . | 30 |
| 4.2  | Variação do ângulo de resistência ao corte no colapso com a inclinação da ancoragem, para o comprimento livre base de cada modelo . . . . .  | 31 |
| 4.3  | Deslocamentos totais obtidos no estudo em que se varia a inclinação da ancoragem, na fase da redução dos parâmetros $c'$ e $\phi'$ . . . . . | 33 |
| 4.4  | Variação do ângulo de resistência ao corte no colapso com a posição da cabeça da ancoragem . . . . .   | 34 |
| 4.5  | Deslocamentos totais, em que se varia a posição da cabeça da ancoragem, na fase da redução dos parâmetros $c'$ e $\phi'$ . . . . .           | 35 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 4.6  | Variação do ângulo de resistência ao corte no colapso com o comprimento de selagem  | 36 |
| 4.7  | Deslocamentos totais obtidos no estudo em que se varia o comprimento de selagem, na fase de redução dos parâmetros $c'-\phi'$   | 37 |
| 4.8  | Variação do ângulo de resistência ao corte de colapso do Modelo D, com fichas distintas, com o comprimento livre  | 38 |
| 4.9  | Variação do comprimento livre com a altura enterrada, para o Modelo D   | 39 |
| 4.10 | Variação do ângulo de resistência ao corte com o ângulo de resistência ao corte do solo- modelos A e D sendo alterado o valor da ficha  | 40 |
| 4.11 | Variação do ângulo de resistência ao corte no colapso com a ficha, considerando as análises paramétricas efetuadas da ficha e do ângulo de resistência ao corte do solo do Modelo D | 41 |
| 4.12 | Deslocamentos totais obtidos no estudo em que se varia os parâmetros do solo, alterando a ficha, na fase de redução dos parâmetros $c'-\phi'$                                       | 42 |
| 4.13 | Variação do ângulo de resistência ao corte de colapso com o ângulo de resistência ao corte do solo- Modelos A e D mantendo o valor das fichas                                       | 43 |
| 4.14 | Deslocamentos totais obtidos no estudo em que se varia os parâmetros do solo, mantendo o valor da ficha, na fase de redução dos parâmetros $c'-\phi'$                               | 44 |

# Lista de Tabelas

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | Tabela com os valores do fator a aplicar para a determinação aproximada de uma altura enterrada tendo em conta que $\delta=2/3\phi'$ , adaptado de (Grabe, 2008). . . . . | 7  |
| 3.1 | Coeficientes parciais para a abordagem de cálculo 1 . . . . .   | 10 |
| 3.2 | Parâmetros iniciais dos modelos utilizados . . . . .  | 11 |
| 3.3 | Parâmetros do solo . . . . .  | 14 |
| 3.4 | Parâmetros da parede moldada . . . . .  | 14 |
| 3.5 | Parâmetros do cabo da ancoragem . . . . .   | 14 |
| 3.6 | Parâmetros do bolbo de selagem . . . . .  | 15 |
| 3.7 | Variação do esforço normal da ancoragem de cada modelo com a profundidade . .   | 16 |
| 4.1 | Variação da ficha e força na ancoragem com o ângulo da ancoragem . . . . .  | 29 |
| 4.2 | Variação da ficha e da força na ancoragem com a posição da cabeça da ancoragem  | 32 |



# Lista de Acrónimos, Abreviaturas e Símbolos

## Abreviaturas

HSM                      Hardening Soil Model

MC                        Mohr-Coulomb

## Símbolos

$\alpha$                       Inclinação da ancoragem

$\alpha_0$                      Inclinação da ancoragem do caso base

$\delta$                         Ângulo de atrito solo-estrutura

$\delta_a$                      Ângulo de atrito solo-estrutura ativo

$\delta_p$                      Ângulo de atrito solo-estrutura passivo

$\epsilon$                         Ângulo que o plano que define o mecanismo faz com a horizontal

$\gamma$                         Peso volúmico não saturado

$\gamma_\phi$                      Coeficiente parcial do coeficiente de atrito

$\gamma_G$                      Coeficiente parcial das ações permanentes

$\gamma_Q$                      Coeficiente parcial das ações variáveis

$\gamma_{sat}$                     Peso volúmico saturado

$\nu$                         Coeficiente de Poisson do solo

$\phi'$                         Ângulo de resistência ao corte

$\phi'_d$                     Valor de cálculo do ângulo de resistência ao corte

$\phi'_r$                     Ângulo de resistência ao corte reduzido

$\phi'_{col.}$                 Ângulo de resistência ao corte de colapso

$\psi$                         Ângulo de dilatância do solo

$\sigma'$                     Tensão vertical efetiva

|                 |   |
|-----------------|---|
| $\sigma'_n$     | Tensão efetiva normal   |
| $a$             | Posição da cabeça da ancoragem  |
| $a_0$           | Posição da cabeça da ancoragem do caso base   |
| $A_{cabo}$      | Área do cabo da ancoragem   |
| $A_{cordao}$    | Área do cordão da ancoragem   |
| $c'$            | Coesão efetiva do solo  |
| $c'_r$          | Coesão efetiva reduzida   |
| $D$             | Distância do pé da cortina ao estrato rígido  |
| $E_d$           | Valor de cálculo do impulso ativo na estrutura  |
| $E_{50}^{ref}$  | Módulo de deformabilidade secante de referência do ensaio triaxial drenado para 50% da tensão deviatórica na rotura               |
| $E_{oed}^{ref}$ | Módulo de deformabilidade tangente de referência do carregamento edométrico, sendo apresentado no Plaxis como configuração padrão |
| $E_{ur}^{ref}$  | Módulo de deformabilidade de referência de descarga/recarga   |
| $f$             | Altura enterrada (ficha)  |
| $f_0$           | Valor da altura enterrada do caso base  |
| $F_d$           | Valor de cálculo da força na ancoragem, por metro   |
| $F_{cordao}$    | Valor de cálculo da força de cada ancoragem   |
| $FS_B$          | Fator de segurança de Broms   |
| $H$             | Profundidade de escavação   |
| $I_{p,B}$       | Impulso passivo de Broms, necessário para garantir, numa dada geometria, o equilíbrio da massa de solo e da cortina               |
| $I_{pd}$        | Valor de cálculo do impulso passivo   |
| $K_x$           | Permeabilidade horizontal do solo   |
| $K_x$           | Permeabilidade vertical do solo   |
| $L_u$           | Comprimento útil da ancoragem   |
| $L_{l_0}$       | Comprimento livre do caso base  |
| $L_l$           | Comprimento livre da ancoragem  |
| $L_{s_0}$       | Comprimento de selagem do caso base   |
| $L_s$           | Comprimento de selagem da ancoragem   |

|             |  |
|-------------|--|
| $P_d$       | Valor de cálculo do peso da massa do solo        |
| $R$         | Reação existente                                 |
| $R_{inter}$ | Fator de redução da resistência da interface     |
| $V$         | Força no pé da cortina                           |
| $e$         | Espessura da cortina                             |
| $m$         | Potência para a dependência da rigidez do solo   |
| $w$         | Peso da cortina por unidade de área (da cortina) |





# Capítulo 1

## Introdução

O presente trabalho incide sobre a problemática do efeito da presença de água no solo, na estabilidade global de uma cortina mono-ancorada. Sendo que cada vez mais o meio urbano se encontra saturado e com excesso populacional, o próprio aproximar à linha da costa das construções levanta o problema da construção na presença de água e da proximidade a construções existentes, sendo as cortinas de contenção, como paredes moldadas ou estacas prancha, soluções inevitáveis para situações em que se tenha de recorrer a escavações do terreno. Muitas vezes são necessárias estruturas de contenção, apoiadas em um ou mais níveis de escoras ou de ancoragens, sendo portanto estas estruturas de grande importância nos dias de hoje.

Para o pré-dimensionamento de estruturas de contenção flexíveis é inevitável estudar o efeito que o nível freático tem nas mesmas, quer seja a nível de deslocamentos, deformações ou noutros parâmetros. As consequências que o nível freático tem na estabilidade global de uma cortina são bastante importantes, uma vez que condiciona grande parte do seu dimensionamento estrutural. Neste trabalho recorre-se a uma análise paramétrica tensão-deformação, que incide sobre a geometria da estrutura e parâmetros do solo, dos modelos em estudo, tendo como objetivo final a determinação numérica do ângulo de resistência ao corte no colapso que causa a rotura global, envolvendo a cortina, as ancoragens e o maciço.

Assim sendo, o trabalho organiza-se da seguinte forma: No presente capítulo é feita uma introdução ao tema em análise; no capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica; no capítulo 3 são apresentados os modelos iniciais estudados, a evolução até ao caso base e é feita a análise dos seus resultados; no capítulo 4 é feita uma análise paramétrica relativamente aos parâmetros da cortina de contenção, das componentes da ancoragem, e dos parâmetros do solo. No capítulo 5 faz-se uma breve conclusão sobre o tema e presente trabalho.



## Capítulo 2

# Colocação do problema

### 2.1 Estruturas de contenção flexíveis

As estruturas de contenção flexíveis têm como objetivo a retenção de solos na periferia de construções e a estabilidade destas cortinas pode ser assegurada de diferentes formas, como se mostra na figura 2.1, podendo consequentemente ser designadas por: cortinas auto-portantes, mono-apoiadas ou multi-apoiadas. As cortinas auto-portantes estão encastradas no terreno e têm a estabilidade garantida devido unicamente ao impulso passivo que é gerado no terreno sob a zona escavada. Nas cortinas mono-apoiadas, existe um elemento de apoio, uma ancoragem ou escora, que garante a estabilidade das mesmas. Nas cortinas multi-apoiadas, há diversos níveis de apoios ao longo do comprimento da cortina, quer com recurso a ancoragens, quer com recurso a escoras.

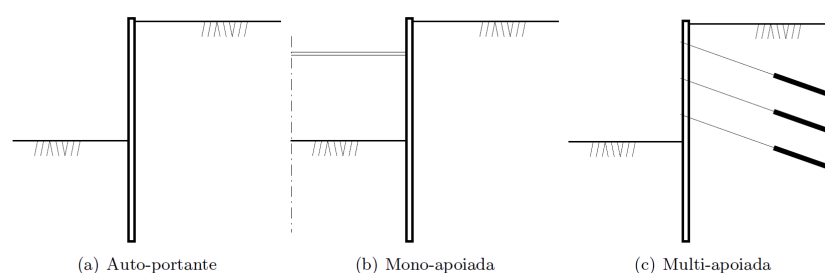


Figura 2.1: Tipos de estruturas de suporte rígidas (Guerra, 2003)

Conforme referido, o presente trabalho incide sobre as cortinas mono-apoiadas, quando este apoio é constituído por uma ancoragem, e em particular sobre a sua estabilidade global.

O dimensionamento de cortinas mono-apoiadas pode ser feito de duas maneiras distintas, recorrendo-se ao método do apoio simples, exemplificado na figura 2.2, ou ao método do apoio fixo. Para o método do apoio simples, no equilíbrio de forças, tradicionalmente os impulsos são considerados

horizontais. Para se considerar atrito solo-estrutura, um dos procedimentos usados é o baseado no proposto por Frank e Gulvanessian (2004), com o qual se procura o equilíbrio de forças horizontais e de momentos, tal como é habitual no método do apoio móvel, sendo ainda que o equilíbrio vertical é assegurado pela correção do ângulo de atrito solo-estrutura  $\delta_a$  ou  $\delta_p$  que são necessariamente mobilizados por forma a garantir o equilíbrio, através de um processo iterativo.

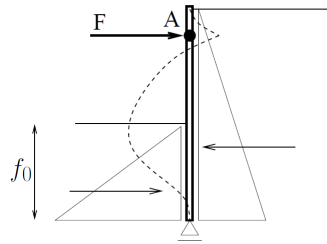


Figura 2.2: Método do apoio móvel (Guerra, 2003)

O processo consiste resumidamente em:

- Considerando que  $\delta_a = \delta_p = \delta$ , determina-se os impulsos ativo e passivo, e por equilíbrio de momentos na cabeça da ancoragem, faz-se uma primeira iteração da altura enterrada  $f_0$ .
- Pelo somatório das forças horizontais é calculada a força na ancoragem.
- Pela equação de equilíbrio de forças verticais é calculado um novo valor de  $\delta_a$  menor que  $\delta$  que assegure o equilíbrio, dado que normalmente neste tipo de estrutura as forças verticais ascendentes são inferiores às forças verticais descendentes e portanto a correção das forças verticais é feita, normalmente, do lado ativo.
- Inicia-se novamente todo o processo acima descrito até que a diferença entre dois  $\delta_a$  consecutivos seja menor ou igual a determinado erro que, no presente trabalho, se definiu igual a 0,001 graus.

## 2.2 Métodos de estabilidade global em cortinas

A verificação da estabilidade global de uma cortina mono-ancorada passa principalmente pela determinação do comprimento da ancoragem. O comprimento da ancoragem é, como se pode observar na figura 2.3, constituído pelo comprimento livre e pelo comprimento de selagem. Caso o comprimento livre seja suficientemente longo para afastar a selagem da cortina, é verificada a segurança. Existe uma condição empírica, também representada na figura 2.3, usada para a determinação da zona de selagem de uma ancoragem, sendo que a localização do ponto P

## 2.2 Métodos de estabilidade global em cortinas

poderá variar. A partir desse ponto é traçada uma linha com a inclinação igual a  $45^\circ + \phi'/2$  correspondente à cunha ativa de Rankine, devendo a selagem localizar-se, de acordo com esta condição empírica, na zona indicada da figura.

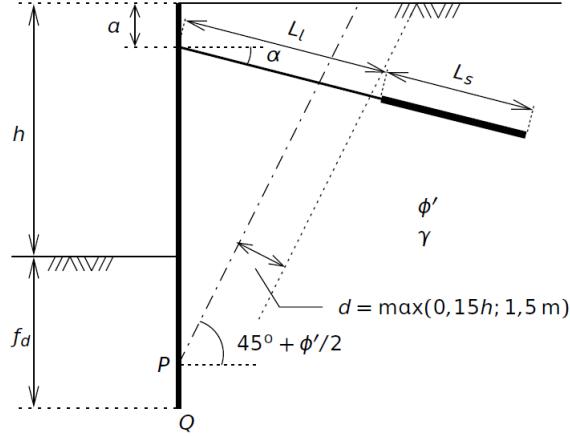


Figura 2.3: Geometria de uma cortina mono-apoiada (Josefino, 2014)

Para a definição do comprimento total de uma ancoragem são necessários estabelecerem-se o comprimento livre,  $L_l$ , e o comprimento de selagem,  $L_s$ . À distância desde a cabeça da ancoragem até meio da zona de selagem chama-se comprimento útil,  $L_u$ , como explicitado na equação 2.1. A definição deste comprimento útil é efetuado, por norma, recorrendo ao método de Broms ou ao método de Kranz. Ambos os métodos são métodos de equilíbrio limite, que estudam o equilíbrio da massa de solo ABCD exposta na figura 2.4. Nesta dissertação usa-se o método de Broms, que estuda o equilíbrio global do conjunto composto por massa de solo e estrutura. Como forças a atuar neste caso temos o peso da massa de solo ABCD,  $P$ , o impulso ativo  $E$ , a reação  $R$ , a força no pé da cortina  $V$  (que pode ser desprezada) e o impulso passivo  $I_p$ .

O comprimento útil é dado pela seguinte equação:

$$L_u = L_l + \frac{L_s}{2} \quad (2.1)$$

sendo  $L_l$  o comprimento livre e  $L_s$  o comprimento de selagem da ancoragem.

O valor de cálculo do peso da massa de solo de cálculo ABCD é dado pela seguinte equação:

$$P_d = \gamma_G A \gamma \quad (2.2)$$

sendo  $\gamma_G$  o coeficiente parcial aplicável às ações permanentes,  $A$  o valor da área do bloco de solo e  $\gamma$  o peso volúmico.

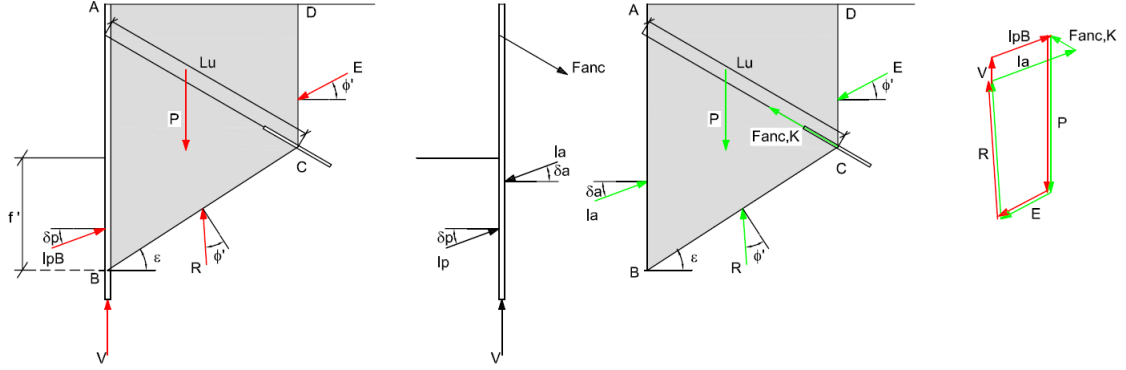


Figura 2.4: Representação das forças envolvidas no método de Broms (à esquerda) e no método de Kranz (à direita). (Josefino, 2014)

O impulso ativo de cálculo é obtido a partir de:

$$E_d = 1/2\gamma_G\gamma K_{a_d}^C(a + L_u\sin\alpha)^2 \quad (2.3)$$

onde  $\gamma$  é o peso volúmico do solo,  $K_{a_d}^C$  o coeficiente de impulso ativo de Coulomb,  $a$  a distância a que a cabeça da ancoragem se encontra da superfície e  $\alpha$  o ângulo que a ancoragem faz com a horizontal.

O impulso passivo de cálculo é dado por:

$$I_{p_d} = (1/2\gamma K_{p_d}^L f^2)/\gamma_{R,e} \quad (2.4)$$

em que  $K_{p_d}^L$  é o valor de cálculo do coeficiente de impulso passivo de Lancelotta (2002) e  $f$  o valor da ficha. Por fim, a reação é dada por:

$$R = \frac{P_d + E_d\sin\phi'_d - I_{pB}\sin\delta_d}{\cos(\epsilon - \phi'_d)} \quad (2.5)$$




onde  $\delta_d$  é o valor de cálculo do ângulo de atrito solo-estrutura obtido através do  $\phi'_d$ ,  $\epsilon$  o ângulo que a cunha faz com a horizontal e  $\phi'_d$  o valor de cálculo do ângulo de resistência ao corte do solo. Resolvendo depois a equação de equilíbrio obtemos o impulso passivo de Broms  $I_{p,B}$ , como demonstrado pela seguinte equação:

$$I_{p,B}\cos\delta_d - E_d\cos\phi'_d - R\sin(\epsilon - \phi'_d) = 0 \quad (2.6)$$

### 2.3 Cálculo de cortinas com percolação

Sendo que não existe nenhum método que permita o cálculo direto da ficha, altura enterrada, de uma cortina flexível com percolação, para o presente trabalho foi utilizada a aproximação indicada pelo manual de dimensionamento de cortinas da empresa ThyssenKrupp de Grabe (2008), em que, como se pode ver pela tabela 2.1, para uma cortina com nível freático à superfície, o valor da ficha pode ser calculada multiplicando o valor desta, calculada anteriormente, sem consideração da percolação, por um valor entre 1,15 a 1,3.

Tabela 2.1: Tabela com os valores do fator a aplicar para a determinação aproximada de uma altura enterrada tendo em conta que  $\delta=2/3\phi'$ , adaptado de (Grabe, 2008).

| Tipo de cortina                           |  |  |  |
|---|---|--|---|
| sem ancoragem                             | 1,20  | 1,30   | 1,40-1,60   |
| ancorada, com base fixa                   | 1,10  | 1,15   | 1,20-1,30   |
| ancorada, com base simplesmente suportada | 1,05  | 1,10   | 1,15-1,20   |

### 2.4 Redução dos parâmetros $c'$ e $\phi'$

O programa Plaxis é um programa de elementos finitos, desenvolvido para a análise de deformações, estabilidade e percolação na engenharia geotécnica. Os modelos desenvolvidos neste programa são usados para simular a deformação e estabilidade em engenharia geotécnica.

Este programa permite através da análise de segurança, a redução progressiva da resistência do solo, através da redução dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$ . Recorrendo-se a essa análise irá ocorrer uma redução "artificial" da resistência, que vai introduzir forças desequilibradas no modelo, estas forças ir-se-ão traduzir em deformações que levarão ao mecanismo de colapso da situação em foco. O fator de segurança, no Plaxis, que é obtido no final é definido por:

$$FS = \frac{c' - \sigma'_n \tan \phi'}{c'_r - \sigma'_n \tan \phi'_r} \quad (2.7)$$

onde  $c'$  e  $\phi'$  são os parâmetros iniciais,  $c'_r$  e  $\phi'_r$  os parâmetros de resistência já reduzidos suficientes para manter o equilíbrio.

Neste método de redução dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$ , a coesão efectiva e a tangente do ângulo de resistência ao corte são reduzidos na mesma proporção, como se pode constatar abaixo:

$$\frac{c'}{c'_r} = \frac{\tan\phi'}{\tan\phi'_r} = FS \quad (2.8)$$

Inicialmente o valor do FS é unitário. Este valor é aumentado através de um processo iterativo até ser atingido o colapso da estrutura.



## Capítulo 3

### Caso base

#### 3.1 Introdução

Neste capítulo modela-se através do programa de cálculo automático Plaxis uma cortina flexível mono-ancorada, neste caso uma parede moldada, que serve de base ao estudo paramétrico descrito no capítulo seguinte. É descrita a sua geometria, o modelo numérico, as características mecânicas do solo, o programa de cálculo utilizado e é feita a análise de resultados do caso base.

#### 3.2 Geometria da cortina

Em termos de geometria, para a cortina de contenção temos como modelo base usado, como se pode observar na figura 3.1, uma profundidade  $H$ , uma dimensão de  $1,5H$  que representa metade da largura de escavação, sendo que a cortina de contenção tem uma altura enterrada  $f$ . A distância do pé da cortina ao estrato rígido é  $D$ . Considerou-se ainda o solo arenoso com comportamento drenado.

No dimensionamento das cortinas mono-ancoradas, no âmbito do presente trabalho é utilizado o NP EN 1997-1 (2010), que considera os valores característicos dos parâmetros de resistência do solo, majorando também as ações e minorando as resistências, com os valores representados na tabela 3.1. Foi utilizada no presente trabalho a abordagem de cálculo 1 (AC1), combinação 2 (GEO). Os coeficientes aplicados estão apresentados na tabela 3.1.

Neste capítulo realiza-se o estudo de quatro modelos, havendo uma evolução desde o mais simples ao mais complexo, que se pretende analisar com maior detalhe e que será o caso base usado como termo de comparação no estudo paramétrico apresentado no capítulo seguinte. Na figura 3.2 podemos observar os quatro modelos em foco, sendo que diferem sobretudo pela posição do nível

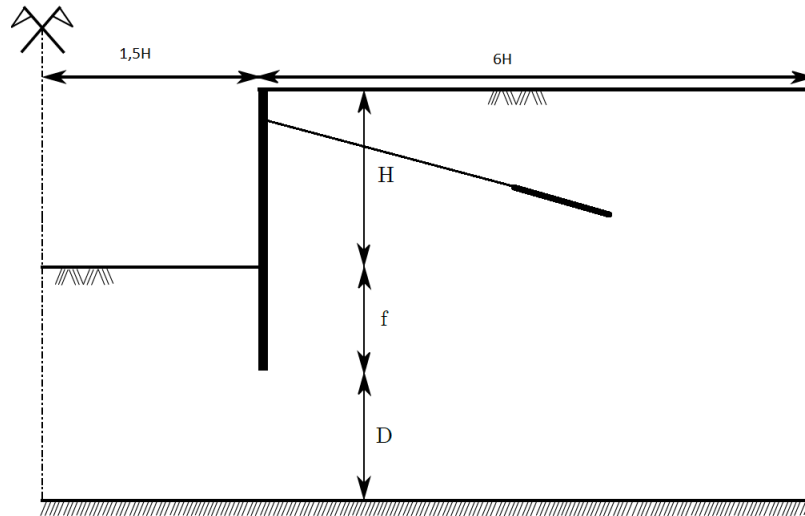


Figura 3.1: Esquema do modelo base usado

Tabela 3.1: Coeficientes parciais para a abordagem de cálculo 1

| AC1            | Comb.2<br>(A2+M2+R1) |
|----------------|----------------------|
| $\gamma_G$     | 1                    |
| $\gamma_Q$     | 1,3                  |
| $\gamma_\phi$  | 1,25                 |
| $\gamma_{R;e}$ | 1                    |

freático. No Modelo A não existe nível freático, no Modelo B o nível freático encontra-se à cota da zona escavada e nos modelos C e D o nível freático encontra-se à superfície do terreno. Os modelos C e D diferem na medida em que no Modelo C se considera uma situação hidrostática e no último existe percolação.

O caso base consiste, como se pode observar na tabela 3.2, numa escavação de 10 m de profundidade, com o valor da ficha  $f$  variável, calculada usando os impulsos ativos determinados pela teoria de Rankine e os passivos por Lancelotta (2002), através do método do apoio simples e do procedimento baseado no pressuposto por Frank e Gulvanessian (2004). Esta altura enterrada depende do nível freático usado, da posição da cabeça da ancoragem, da inclinação da ancoragem e também por exemplo, do ângulo de resistência ao corte,  $\phi'$ , sendo que para o Modelo D, a altura enterrada considerada é 1,2 vezes superior à do Modelo C, correspondente a uma cortina ancorada com base simplesmente suportada, ver Quadro 3.2. Foram considerados ainda quatro níveis de escavação a cada 2,5 m de profundidade.

Para o modelo base foram definidos diversos parâmetros iniciais, entre eles a inclinação da ancoragem,  $\alpha_0$ , a posição da cabeça da ancoragem,  $a_0$ , o ângulo de resistência ao corte,  $\phi'$  e o comprimento de selagem base,  $L_{s0}$ .

### 3.2 Geometria da cortina

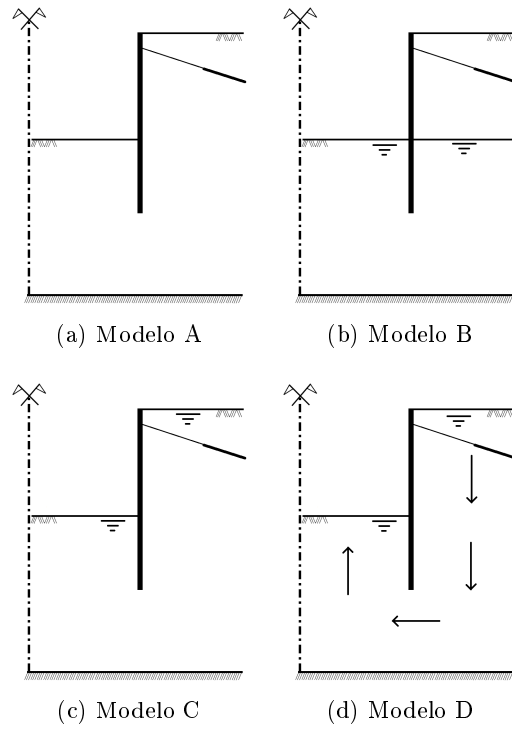


Figura 3.2: Modelos do caso base - variação do nível freático

Os parâmetros iniciais usados para cada modelo são os apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros iniciais dos modelos utilizados

|                | Modelo A | Modelo B | Modelo C | Modelo D |
|----------------|----------|----------|----------|----------|
| $H$ (m)        | 10       | 10       | 10       | 10       |
| $\phi'$ (°)    | 30       | 30       | 30       | 30       |
| $\delta$ (°)   | 16,56    | 16,56    | 16,56    | 16,56    |
| $\delta_a$ (°) | 6,9      | 7,5      | 16,56    | 16,56    |
| $\delta_p$ (°) | 16,56    | 16,56    | 13,52    | 13,52    |
| $F_d$ (kN/m)   | 240,6    | 249,8    | 650,0    | 650,0    |
| $\alpha_0$ (°) | 15       | 15       | 15       | 15       |
| $a_0$ (m)      | 2        | 2        | 2        | 2        |
| $f$ (m)        | 3,97     | 4,43     | 9,95     | 11,95    |
| $L_{l_0}$ (m)  | 9        | 10       | 16       | 17,5     |
| $L_{s_0}$ (m)  | 6        | 6        | 10       | 10       |

Em termos de comprimento livre base,  $L_{l_0}$ , após alguns valores testados, foi escolhido como base um valor que permitisse a obtenção de um ângulo de resistência ao corte no colapso, na fase de redução dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$ , o mais próximo possível do ângulo de resistência ao corte utilizado no dimensionamento da cortina através do método do apoio simples.

### 3.3 Modelo numérico

Considerou-se um desenvolvimento horizontal do terreno suportado de cerca de  $6H$  de forma a minimizar erros sobre a influência da ancoragem. O comprimento de selagem inicial considerado foi de 6 m, sendo que para os Modelos C e D, uma vez que a força na ancoragem é bastante superior, o comprimento de selagem teve de ser aumentado para os 10 m.

Na figura 3.3, podemos observar o faseamento construtivo que foi utilizado na modelação do caso base, sendo depois descrito o mesmo. Existiu sempre um rebaixamento do nível freático no intervalo de escavação e cálculo do escoamento nas fases 2, 5, 6 e 7.

- Fase 1 - Ativação da parede moldada.
- Fase 2 - Escavação do primeiro nível - 2,5 m.
- Fase 3 - Colocação da ancoragem e ativação do pré-esforço.
- Fase 4 - Perdas do pré-esforço.
- Fase 5 - Escavação do segundo nível - 2,5 m.
- Fase 6 - Escavação do terceiro nível - 2,5 m.
- Fase 7 - Escavação do quarto nível - 2,5 m.
- Fase 8 - Redução dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$ .

### 3.4 Características mecânicas

Considerou-se o solo arenoso, com comportamento drenado, estando as suas características mecânicas indicadas na tabela 3.3.

A cortina de contenção usada é uma parede moldada de 0,40 m de espessura e com as características apresentadas na tabela 3.4.

Para os parâmetros da ancoragem, mostrados na tabela 3.5, foi utilizado um método iterativo, de modo a se garantir que a armadura do cabo de facto verifica a segurança para a força de pré-esforço aplicada. Neste método, tendo o comprimento livre adotado e a força da ancoragem obtida pelo método do apoio simples, é então calculada a armadura da ancoragem, sendo que foi considerado um aço de alta resistência A1600/1860 e cordões de 15 mm-0,6-normal. Considerou-se um E, módulo de elasticidade de 195 GPa, um espaçamento de 3 m entre ancoragens, e a área do cabo foi calculada tendo em conta o pré-esforço aplicado, a respetiva força por cordão,

### 3.4 Características mecânicas

---

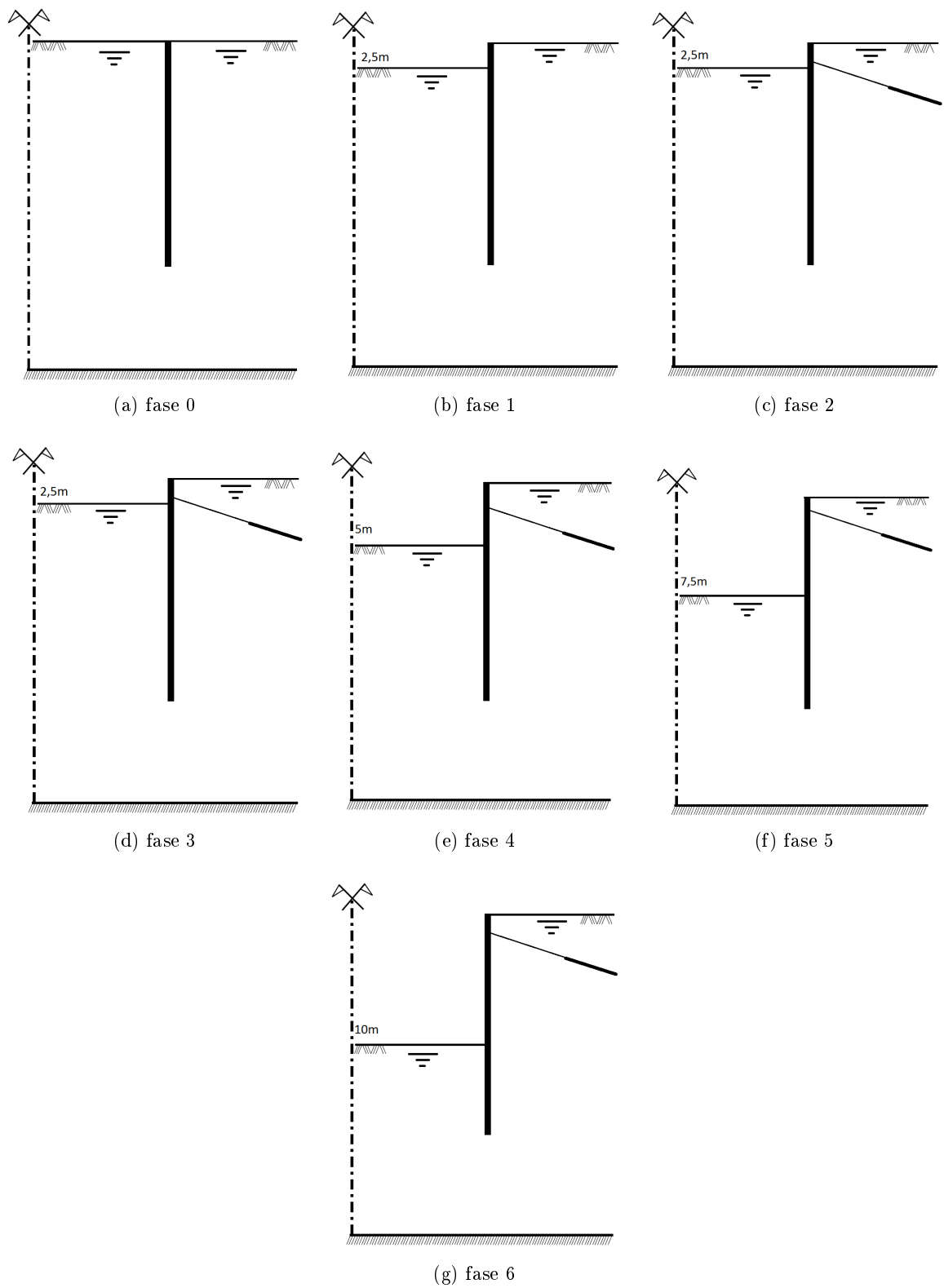


Figura 3.3: Faseamento construtivo do modelo base

Tabela 3.3: Parâmetros do solo

|                    |                 |                      |
|--------------------|-----------------|----------------------|
| <b>Geral</b>       | $\gamma$        | 18 kN/m <sup>3</sup> |
|                    | $\gamma_{sat}$  | 20 kN/m <sup>3</sup> |
| <b>Rigidez</b>     | $E_{50}^{ref}$  | 25 MPa               |
|                    | $E_{oed}^{ref}$ | 25 MPa               |
|                    | $E_{ur}^{ref}$  | 75 MPa               |
|                    | $m$             | 0,5                  |
| <b>Resistência</b> | $c'$            | 1 kN/m <sup>2</sup>  |
|                    | $\phi'$         | 30°                  |
|                    | $\psi$          | 0°                   |
| <b>Interface</b>   | $R_{inter}$     | 0,67                 |
| <b>Escoamento</b>  | $K_x$           | 0,001 m/s            |
|                    | $K_y$           | 0,001 m/s            |

Tabela 3.4: Parâmetros da parede moldada

|           |   |
|-----------|---|
| <b>w</b>  | 10 kN/m/m                                 |
| <b>e</b>  | 0,8 m                                     |
| $\nu$     | 0,2                                       |
| <b>EI</b> | 1,28E10 <sup>6</sup> kN/m <sup>2</sup> /m |
| <b>EA</b> | 2,40E10 <sup>7</sup> kN/m                 |

o número de cordões utilizado e ainda a área por cordão. As perdas de pré-esforço resultam do cálculo da rigidez teórica e para a reentrada das cunhas, no instante da aplicação do pré-esforço, foi considerada um valor correspondente a uma diminuição do alongamento do cabo de cerca de 6 mm.

Tabela 3.5: Parâmetros do cabo da ancoragem

|   | <b>Modelo A</b>      | <b>Modelo B</b>      | <b>Modelo C</b>      | <b>Modelo D</b>      |
|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Aço alta resistência</b>                 | A 1600/1860          | A 1600/1860          | A 1600/1860          | A 1600/1860          |
| <b>E (GPa)</b>                              | 195                  | 195                  | 195                  | 195                  |
| $A_{cordao}$<br>(mm <sup>2</sup> )          | 140                  | 140                  | 140                  | 140                  |
| $F_{cordao}$<br>(minorada) (kN)             | 226,09               | 226,09               | 226,09               | 226,09               |
| <b>n° de cordões</b>                        | 5                    | 5                    | 12                   | 12                   |
| $A_{cabo}$<br>(mm <sup>2</sup> /m)          | 233,33               | 233,33               | 560,00               | 560,00               |
| <b>Pré-esforço máximo (kN/m)</b>            | 250,71               | 258,92               | 663,63               | 662,46               |
| <b>Pré-esforço após<br/>descarga (kN/m)</b> | 240,60               | 249,82               | 649,98               | 649,98               |
| <b>EA (kN/m)</b>                            | 4,55E10 <sup>4</sup> | 4,55E10 <sup>4</sup> | 1,09E10 <sup>5</sup> | 1,09E10 <sup>5</sup> |

O bolbo de selagem tem as propriedades descritas na tabela 3.6.

### 3.5 Programa de cálculo usado

Tabela 3.6: Parâmetros do bolbo de selagem

|                          |                |
|--------------------------|----------------|
| <b>E(calda)</b><br>(kN)  | $2,16E10^7$    |
| <b>D(furo)</b> (m)       | 0,2            |
| <b>A(furo)</b> ( $m^2$ ) | $3,14E10^{-2}$ |
| <b>EA</b> (kN/m)         | $2,26E10^5$    |

### 3.5 Programa de cálculo usado

O programa de cálculo usado, como referido anteriormente, foi o programa Plaxis. Neste foram usados os modelos Hardening Soil e Mohr-Coulomb, assim como elementos de 15 nós e uma malha de elementos finitos fina, como o exemplo representado na figura 3.4.

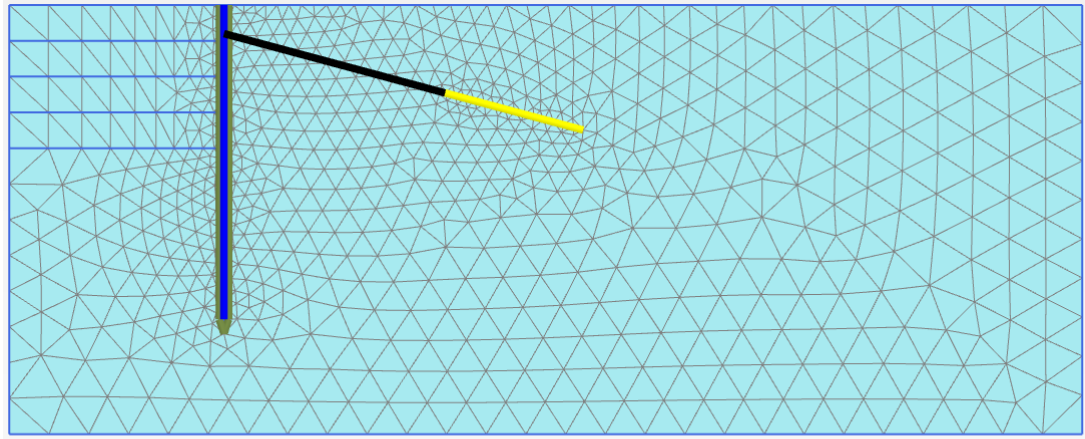


Figura 3.4: Exemplo de malha de elementos finitos utilizada

O modelo Mohr-Coulomb usado na redução dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$ , é um modelo elástico linear perfeitamente plástico, que necessita de cinco parâmetros para a sua definição:  $\nu$ ,  $\phi'$ ,  $c'$  e  $\psi$  (Plaxis, 2014). O modelo Hardening Soil permite simular o comportamento não linear, sendo portanto adequado ao caso em estudo, uma vez que os solos quando solicitados a carregamentos comportam-se desse modo.

No que respeita à rigidez, o modelo HSM utiliza: A rigidez triaxial de carga  $E_{50}^{ref}$ , que corresponde ao módulo de deformabilidade secante de referência do ensaio triaxial drenado para 50% da tensão deviatória na rotura, a rigidez edométrica de carga  $E_{oed}^{ref}$ , que corresponde ao módulo de deformabilidade tangente de referência do carregamento edométrico, sendo apresentado no Plaxis como configuração padrão, e ainda a rigidez triaxial de descarga-recarga  $E_{ur}^{ref}$ , que corresponde ao módulo de deformabilidade de referência de descarga/recarga.

O programa Plaxis propõe como valores padrão  $E_{oed}^{ref} \approx E_{50}^{ref}$  e  $E_{ur}^{ref} \approx 3E_{50}^{ref}$ . Deste modo, para caracterizar a rigidez do solo basta definir o  $E_{50}^{ref}$ .

### 3.6 Análise de resultados - Modelos A, B, C e D

Nesta secção irá ser feita uma análise aos resultados obtidos nos modelos A, B, C e D, nomeadamente a nível de deslocamentos totais, deslocamentos horizontais, deslocamentos verticais, força nas ancoragens e carga hidráulica, na fase de redução dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$ . É ainda de referir que foi usado o HSM para o cálculo tensão-deformação, até à fase de estabilidade global, momento a partir do qual se usou MC.

#### 3.6.1 Esforços nas ancoragens

Apresenta-se na tabela 3.7, a variação do esforço nas ancoragens a cada nível de escavação, para os modelos A, B, C, e D.

Analisando a tabela podemos constatar que:

- A variação do esforço normal é similar em todos os modelos, atingindo sempre o máximo no último nível de escavação pois à medida que a escavação avança em profundidade o esforço nas ancoragens aumenta.
- Nos modelos A, B e D vemos que pela última fase poderia ter sido usado um valor de pré-esforço inicial maior, uma vez que a diferença de valores de pré-esforço entre a primeira e última fases ainda é substancial, enquanto que no Modelo C o valor usado foi exatamente o adequado uma vez que a variação do seu valor entre a primeira e última fase é residual.
- O Modelo D foi o que apresentou maiores esforços na ancoragem, enquanto que o Modelo A foi o que apresentou os menores.

Tabela 3.7: Variação do esforço normal da ancoragem de cada modelo com a profundidade

| Fase                                       | Prof. (m) | N (kN/m) |        |        |        |
|--|-----------|----------|--------|--------|--------|
|  |           | A        | B      | C      | D      |
| <b>3-Escavação e activação pré-esforço</b> | 2,5       | 248,87   | 258,92 | 663,63 | 661,93 |
| <b>4-Perdas pré-esforço</b>                | 2,5       | 240,60   | 249,82 | 649,98 | 649,98 |
| <b>5-Escavação</b>                         | 5         | 243,71   | 253,13 | 657,05 | 655,86 |
| <b>6-Escavação</b>                         | 7,5       | 250,07   | 259,50 | 667,72 | 667,28 |
| <b>7-Escavação</b>                         | 10        | 264,44   | 276,81 | 667,41 | 678,48 |



### 3.6 Análise de resultados - Modelos A, B, C e D

---

#### 3.6.2 Deslocamentos totais

Seguidamente são apresentados, na figura 3.5, os deslocamentos totais, na fase de redução dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$ , para os quatro modelos estudados. Através da análise da mesma podemos inferir que:

- Vemos que em todos os modelos existe um mecanismo de rotura global, englobando grande parte do terreno suportado.
- Nos quatro modelos, na zona de solo suportada pela cortina, vemos que os deslocamentos mais significativos são mais concentrados no tardo e na zona de comprimento livre.
- Em todos os modelos observamos que o fundo da escavação sofre deslocamentos significativos.

#### 3.6.3 Deslocamentos verticais

Seguidamente são apresentados, na figura 3.5, os deslocamentos verticais, na fase de redução dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$ , para os quatro modelos estudados. Através da análise da mesma podemos inferir que:

- Nos quatro modelos observamos claramente a formação de uma cunha de deslocamentos verticais relevantes junto ao bolbo de selagem.
- Nos modelos A, B e C os deslocamentos mais proeminentes surgem junto à tardo da cortina de contenção, enquanto que no Modelo D os deslocamentos mais relevantes dão-se numa zona mais concentrada da zona do comprimento livre.
- Em todos os modelos existe um empolamento do fundo da escavação, mais concretamente junto à interface solo-estrutura.

#### 3.6.4 Deslocamentos horizontais

Seguidamente são apresentados, na figura 3.5, os deslocamentos horizontais, na fase de redução dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$ , para os quatro modelos estudados.

Através da análise da mesma podemos inferir que:

- Todos os modelos apresentam na superfície de solo contida pela cortina uma zona de deslocamentos horizontais relevante.

- No Modelo D é de notar que na zona do bolbo de selagem e a meio do tardo da cortina de contenção existem zonas concentradas de elevados deslocamentos.

## 3.7 Análise de resultados - Modelo D

De seguida será analisado de forma mais minuciosa o Modelo D, onde se irão estudar certos parâmetros como tensões de corte relativas, deslocamentos horizontais, deslocamentos verticais e carga hidráulica, durante o seu faseamento construtivo.

### 3.7.1 Carga Hidráulica

Apresenta-se, na figura 3.6, a carga hidráulica no solo para o Modelo D na última fase de escavação.

Este modelo, uma vez que é o único com percolação e o modelo considerado como base de comparação para o estudo paramétrico efetuado mais à frente, será o que tem maior interesse de análise para este parâmetro.

Analisando a figura podemos observar as curvas equipotenciais.

### 3.7.2 Tensões de corte

Na figura 3.7 as tensões de corte relativas do Modelo D.

Analisando a figura pode-se constatar o seguinte:

- As zonas de maiores tensões são no fundo da escavação, com um concentrar das tensões na interface solo-estrutura, no topo da cortina de contenção e igualmente na zona de selagem.
- À medida que a escavação avança há um acréscimo de tensão nas zonas anteriormente referidas e também no bolbo de selagem.
- Na fase de colapso é atingido praticamente um estado de tensão máxima.

### 3.7 Análise de resultados - Modelo D

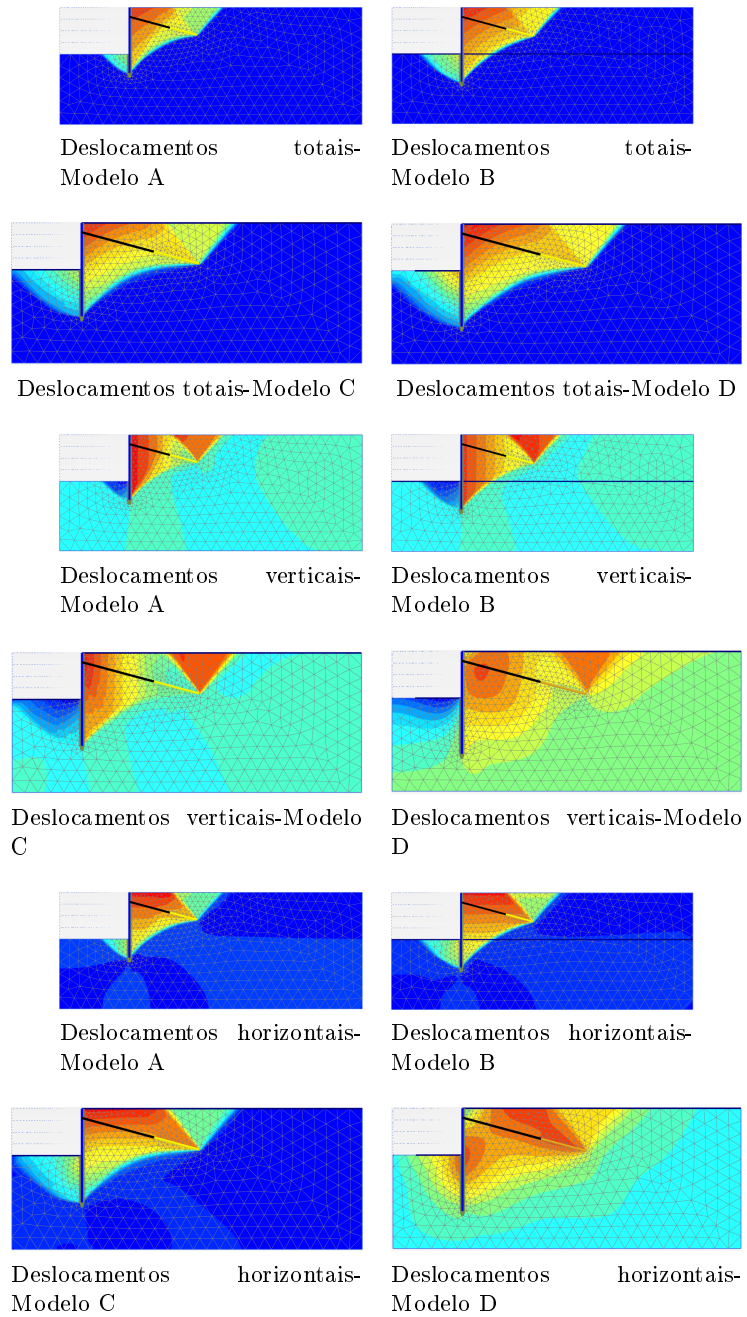


Figura 3.5: Deslocamentos totais, verticais e horizontais na fase de redução dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$

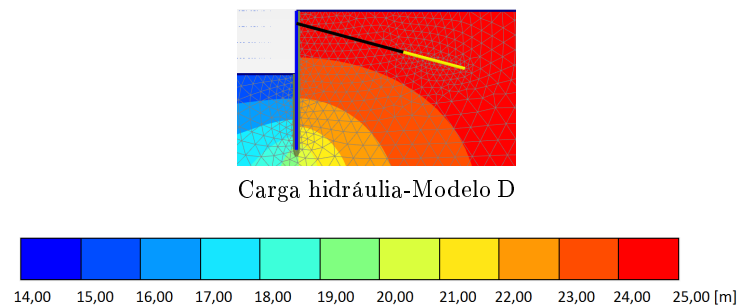


Figura 3.6: Carga hidráulica do Modelo D

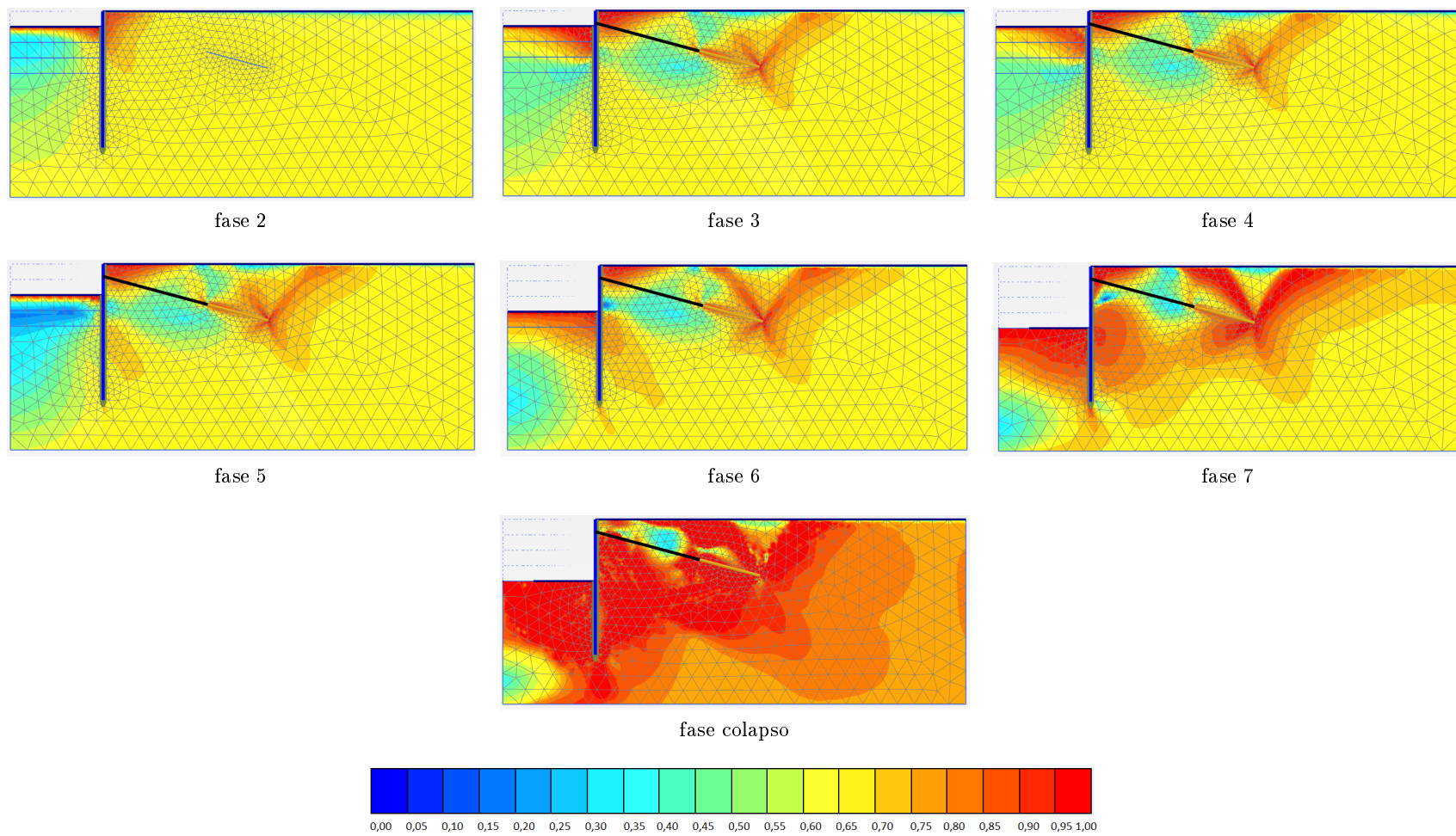


Figura 3.7: Tensões de corte relativas das várias fases do Modelo D

### 3.7 Análise de resultados - Modelo D

---

#### 3.7.3 Deslocamentos verticais

Mostram-se na figura 3.8, os deslocamentos verticais dos Modelo D.

Analisando a figura pode-se constatar o seguinte:

- A fase que apresenta maiores deslocamentos verticais é a 7, nomeadamente deslocamentos ascendentes no fundo da escavação, havendo portanto um empolamento do terreno.
- A fase que apresenta os menores deslocamentos verticais é a fase 2.
- Ao longo das fases de escavação é de notar que na zona de selagem começa a surgir a formação de uma cunha com deslocamentos descendentes de valor relevante, mas também aparecem estes deslocamentos na zona de comprimento livre numa área, de forma circular, bastante concentrada.
- É de notar ainda que com o evoluir da escavação, a zona onde ocorre os maiores valores do empolamento na zona de escavação aproxima-se da cortina de contenção.
- Na fase de colapso nota-se uma cunha de deslocamentos verticais muito relevantes junto ao bolbo de selagem e junto à tardoz da cortina.

#### 3.7.4 Deslocamentos horizontais

Na figura 3.9 representam-se os deslocamentos horizontais das várias fases do Modelo D.

Analisando a figura pode-se constatar o seguinte:

- Na 2ª fase de escavação, o topo da cortina sofre um ligeiro deslocamento, havendo um avançar da mesma.
- Na 7ª fase aparecem os maiores deslocamentos, à superfície do terreno contido pela parede moldada, e igualmente junto à tardoz da mesma.
- Nas restantes fases, devido ao pré-esforço aplicado, o topo da cortina tem um deslocamento para o tardoz da cortina. Vai também surgindo uma zona de deslocamentos elevada na zona de selagem da ancoragem.
- Na fase de colapso existe um mecanismo formado envolvendo todo o terreno suportado, sendo que os maiores deslocamentos ocorrem junto à superfície do terreno.

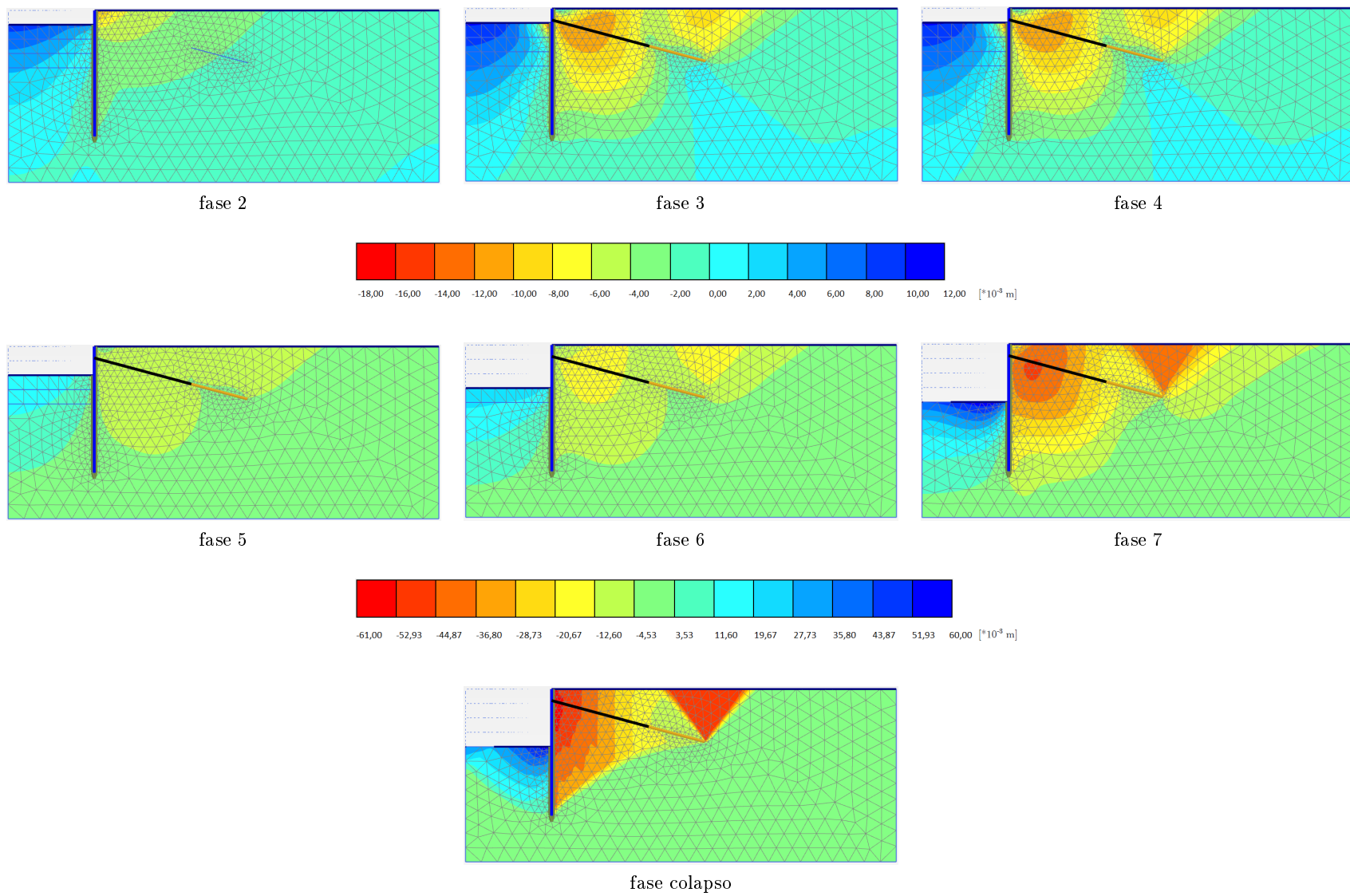


Figura 3.8: Deslocamentos verticais das várias fases do Modelo D



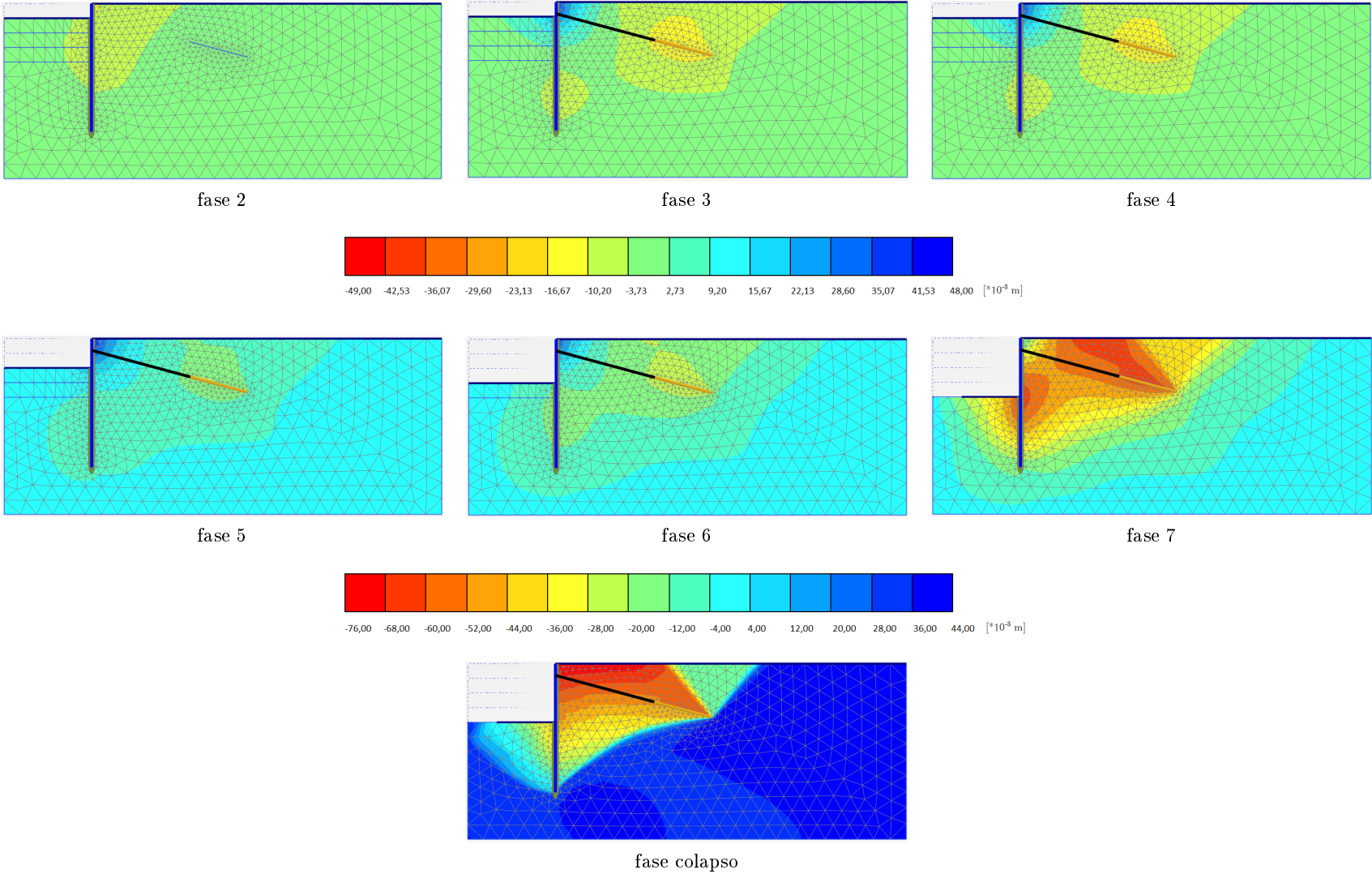


Figura 3.9: Deslocamentos horizontais das várias fases do modelo D

### 3.8 Análise da influência do comprimento livre

Sendo o trabalho sobre a estabilidade global e tendo o comprimento livre das ancoragens, como é compreensível, tanta influência nessa estabilidade, sentiu-se a necessidade de analisar para o conjunto dos modelos A, B, C e D, do caso base, a influência da alteração desse parâmetro na estabilidade global da cortina. Sendo assim, seguidamente são analisados, em paralelo, os resultados dos quatro modelos, no que respeita à influência do comprimento livre,  $L_l$ , no  $\phi'_{col.}$  na fase de redução dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$ .

É importante referir que o Modelo D aparece nos gráficos de forma destacada, uma vez que irá aparecer mais à frente no estudo paramétrico como termo de comparação com os outros casos. Sendo que os pontos realçados, presentes nos gráficos 3.10, 3.11 e 3.12, são referentes aos comprimentos livres,  $L_{l_0}$ , usados como caso base.

Para a determinação do comprimento livre base,  $L_{l_0}$ , foi efetuada a comparação entre o valor de cálculo do ângulo de resistência ao corte do solo,  $\phi'_d$ , que tem um valor de aproximadamente  $24,79^\circ$ , com os ângulos de resistência ao corte obtidos, na fase de estabilidade global, para os vários comprimentos livres calculados. Sendo que o valor de  $L_{l_0}$  escolhido para caso base, foi aquele cujo  $\phi'_d$  se aproximava mais do valor  $24,79^\circ$ .

Na figura 3.10 temos, como se pode observar, a evolução do  $\phi'_{col.}$  com o comprimento livre  $L_l$  para cada modelo. Temos igualmente na figura 3.11 um gráfico onde podemos analisar a evolução do  $\phi'_{col.}$  com um fator constituído pelo comprimento livre,  $L_l$ , sobre a ficha,  $f$ , para os quatro modelos estudados. Por fim, temos o gráfico 3.12, onde pode ser analisada a evolução do  $\phi'_{col.}$  com um fator constituído pela soma do comprimento livre,  $L_l$ , com o comprimento de selagem,  $L_s$ , sobre a ficha,  $f$ , para os quatro modelos estudados.

Analisando mais em detalhe os resultados obtidos no gráfico 3.10, vemos que para todos os modelos à medida a que o comprimento livre aumenta, o valor do  $\phi'_{col.}$  diminui, sendo que tende inclusivamente para um patamar horizontal aproximadamente constante. O patamar é atingido para diferentes valores de  $L_l$ , consoante o modelo, sendo que no caso dos modelos A a C esse patamar converge para o mesmo valor, ao passo que para o Modelo D tende para um valor diferente, menor que os outros. Isto demonstra que o valor da ficha é conservativo face aos outros resultados (Modelos A, B e C), isto é, tem maior nível de segurança. Caso tivessem um nível igual, o patamar seria o mesmo.

Com os resultados obtidos no gráfico 3.11, vemos que os três primeiros modelos tendem para uma gama de valores de  $\phi'_{col.}$  similar. Enquanto que o Modelo D tem um patamar horizontal que tende para um valor inferior aos restantes. Em todos os casos à medida que o  $L_l$  aumenta, o  $\phi'_{col.}$  diminui.

Analisando ainda o gráfico 3.12, é possível ver que os modelos A e B se encontram praticamente



### 3.8 Análise da influência do comprimento livre

sobrepostos, o Modelo C ainda que ligeiramente afastado tem um patamar horizontal que tende para os mesmos valores de  $\phi'_{col.}$  dos dois modelos anteriores, e o Modelo D encontra-se numa posição bastante distinta dos demais, com um patamar horizontal que atinge valores de  $\phi'_{col.}$  abaixo dos outros três modelos referidos.

Fazendo-se agora uma análise aos mecanismos de colapso de cada modelo a vários comprimentos livres, optou-se por serem focados em maior detalhe o  $L_l$  com o valor de 7 m, 8 m, 9 m, 11 m, 12 m, 15 m, 17,5 m, 20 m, 25 m, 30 m, 40 m e 45 m.

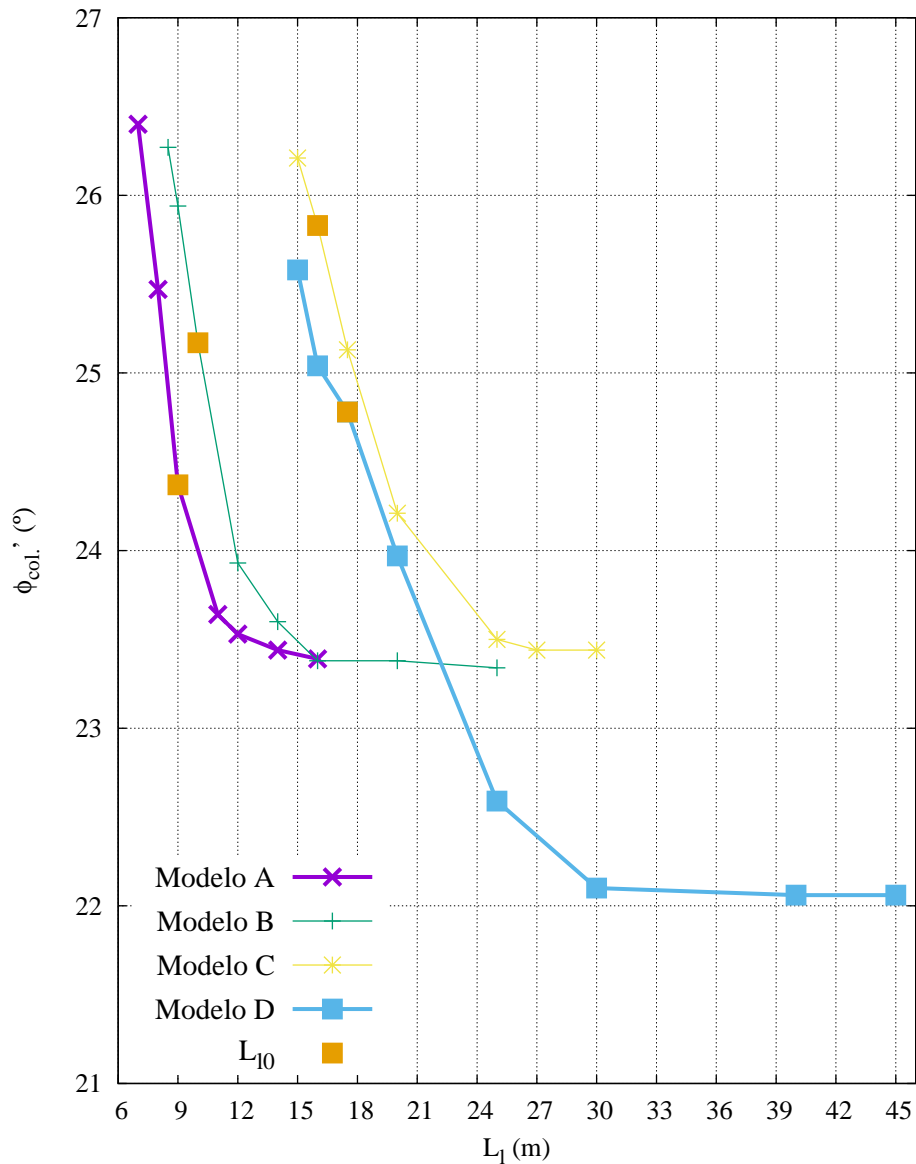


Figura 3.10: Variação do ângulo de resistência ao corte de colapso dos vários modelos com o comprimento livre

Observando a figura 3.13, podemos constatar que:

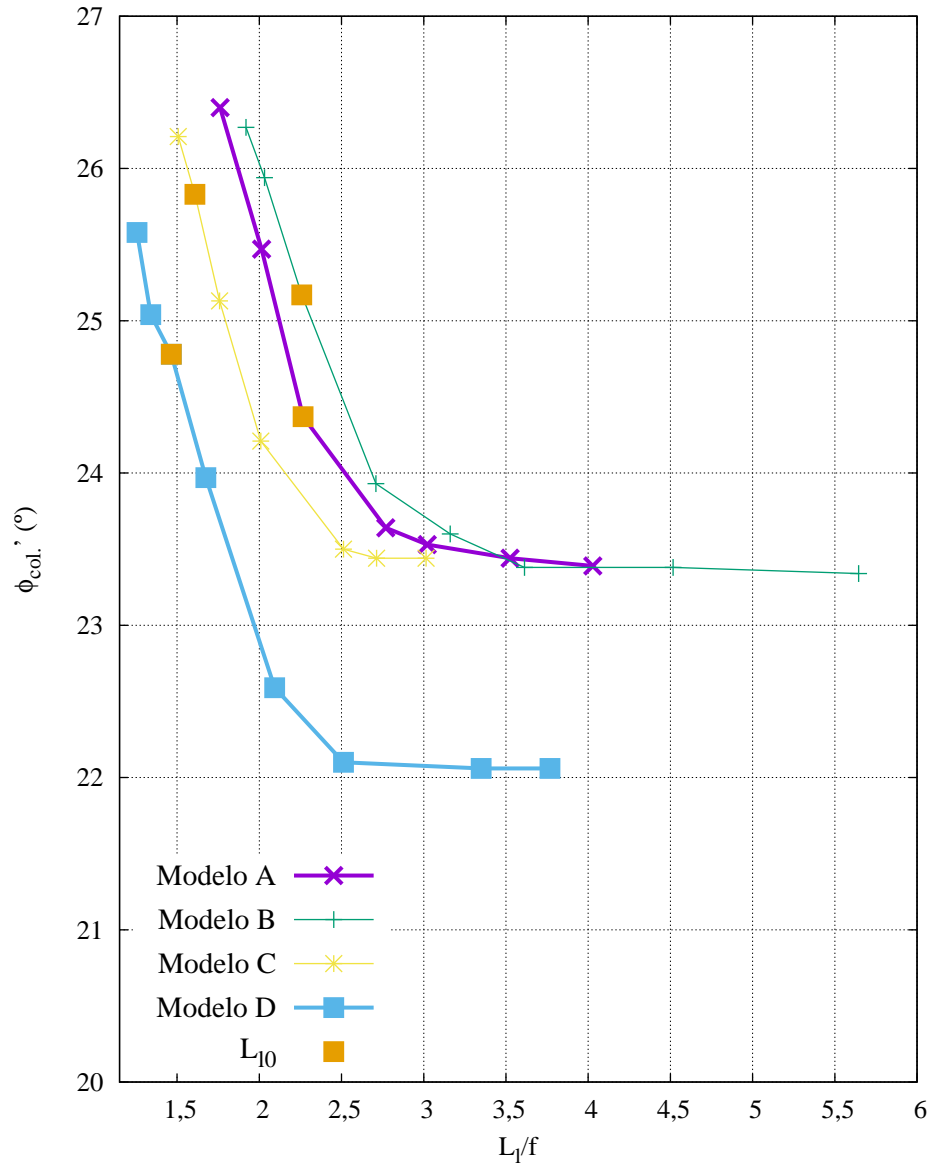


Figura 3.11: Variação do ângulo de resistência ao corte de colapso dos vários modelos com o fator de comprimento livre/ficha

- Primeiramente podemos reparar que existem dois mecanismos, um para  $L_l$  menores, correspondente à rotura global, e outro para  $L_l$  maiores, em que o mecanismo é o de mobilização das cunhas ativas e passivas, correspondendo este último ao patamar horizontal referido anteriormente.
- O mecanismo correspondente ao patamar é independente do comprimento, o que justifica o próprio patamar.
- Para comprimentos livres,  $L_l$ , até aos 9 m, os dois primeiros modelos formam um mecanismo

### 3.8 Análise da influência do comprimento livre

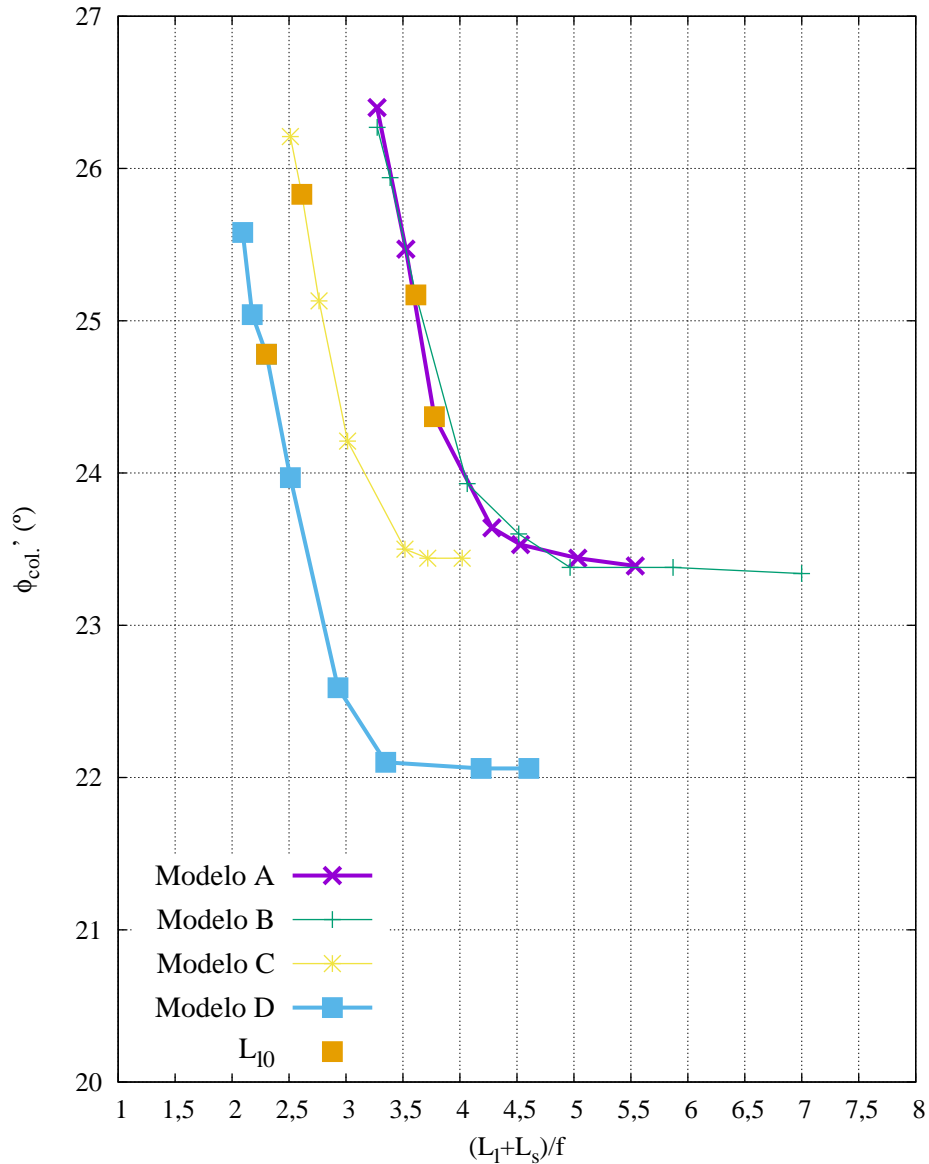


Figura 3.12: Variação do ângulo de resistência ao corte de colapso dos vários modelos com o fator de comprimento livre + selagem/ficha

muito semelhante que começa no pé da cortina e vai até ao fim da zona de comprimento de selagem, sendo para um  $L_l$  superior a 11 m podemos observar a formação de duas cunhas na cortina de contenção, que representam respetivamente a cunha ativa no tardo da cortina e a cunha passiva do lado da escavação.

- Para os modelos A e B observamos que os mecanismos formados para um  $L_l$  de 9 m e 11 m, coincidem no gráfico com o  $\phi'_{col.}$  em que estes começam a tender para o patamar horizontal.

- Para comprimentos livres,  $L_l$ , superiores aos 25 m, os modelos C e D revelam igualmente a existência de uma cunha representativa dos impulsos ativos e passivos existentes na cortina, este facto coincide exatamente com o valor de  $\phi'_{col}$ , para o qual ambos os modelos invertem o andamento do gráfico para o patamar horizontal.

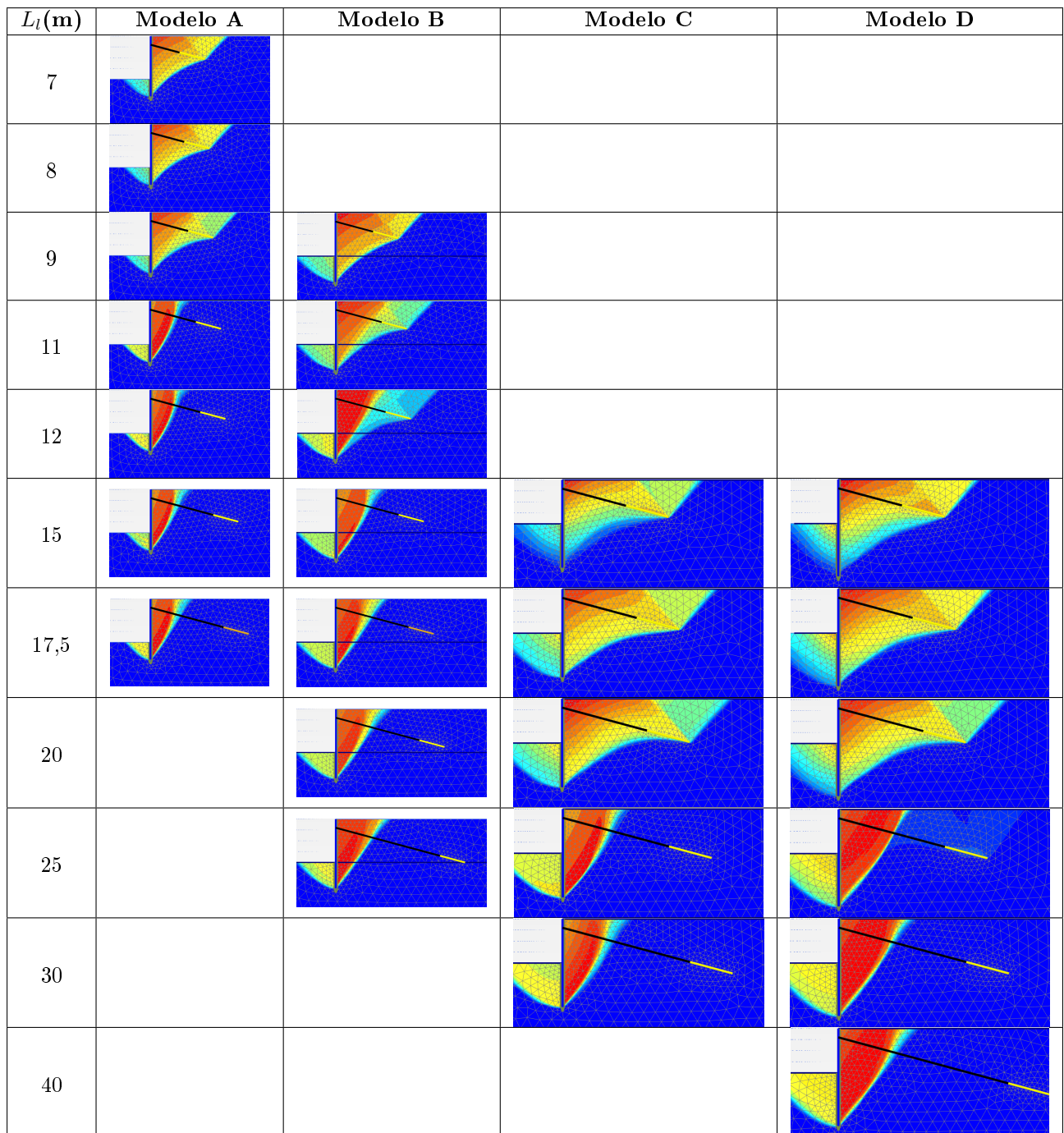


Figura 3.13: Deslocamentos totais, na fase de redução dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$ , para os modelos A e B

## Capítulo 4

# Estudo paramétrico

### 4.1 Introdução

Neste capítulo, será efetuado um estudo paramétrico com variação de diversos parâmetros do Modelo D (caso base) e do Modelo A, que é usado como termo de comparação de modo a ser possível analisar em paralelo um caso sem nível freático, com um caso em que há nível freático e percolação. Os parâmetros que foram estudados foram: o ângulo que a ancoragem faz com a horizontal ( $\alpha$ ), comprimento de selagem ( $L_s$ ), variação da altura enterrada ( $f$ ), posição da cabeça da ancoragem ( $a$ ) e ainda variação do ângulo de resistência ao corte do solo ( $\phi'$ ).

### 4.2 Estudo da influência da inclinação da ancoragem

Nesta secção é estudada a influência da inclinação da ancoragem. Estes cálculos implicaram novos valores de ficha e da força na ancoragem, como mostrado na tabela 4.1. As inclinações consideradas no presente estudo foram:  $12,5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $17,5^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $35^\circ$  e  $40^\circ$ .

Tabela 4.1: Variação da ficha e força na ancoragem com o ângulo da ancoragem

|                       | Modelo A       |       | ModeloD        |       |
|-----------------------|----------------|-------|----------------|-------|
| $\alpha$ ( $^\circ$ ) | F. anc. (kN/m) | f (m) | F. anc. (kN/m) | f (m) |
| 12,5                  | 236,12         | 3,95  | 651,57         | 11,91 |
| 15                    | 240,60         | 3,97  | 649,98         | 11,95 |
| 17,5                  | 245,83         | 3,99  | 650,56         | 11,98 |
| 20                    | 253,05         | 4,02  | 653,19         | 12,03 |
| 25                    | 267,91         | 4,08  | 665,70         | 12,09 |
| 30                    | 287,85         | 4,15  | 688,67         | 12,13 |
| 35                    | 314,03         | 4,22  | 785,55         | 12,17 |
| 40                    | -              | -     | 783,23         | 12,25 |

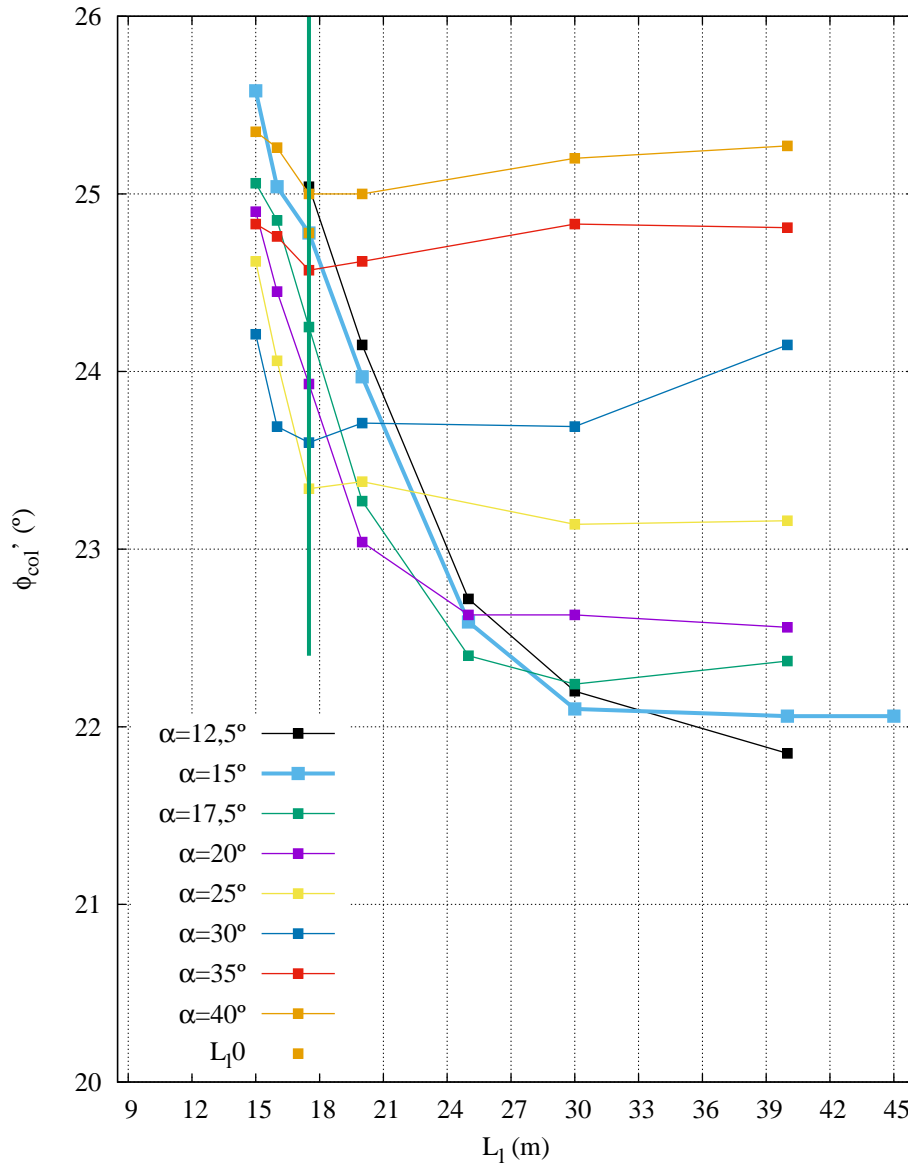


Figura 4.1: Variação do comprimento livre com ângulo de resistência ao corte no colapso, para as diversas inclinações de ancoragem do Modelo D

Primeiramente é possível observar pela tabela 4.1 que à medida que o  $\alpha$  aumenta, também a altura enterrada e força na ancoragem aumentam, para os dois modelos.

Analisando mais atentamente a figura 4.1, referente apenas ao Modelo D, podemos notar que para comprimentos livres mais baixos, se a inclinação da ancoragem for baixa, leva a ângulos de resistência ao corte de colapso,  $\phi'_{col.}$ , mais elevados e portanto menos a favor da segurança. Por outro lado, para comprimentos livres maiores vemos que estes mesmos ângulos de ancoragem mais baixos, são os que levam a melhores resultados a nível do  $\phi'_{col.}$ , ocorrendo uma queda

## 4.2 Estudo da influência da inclinação da ancoragem

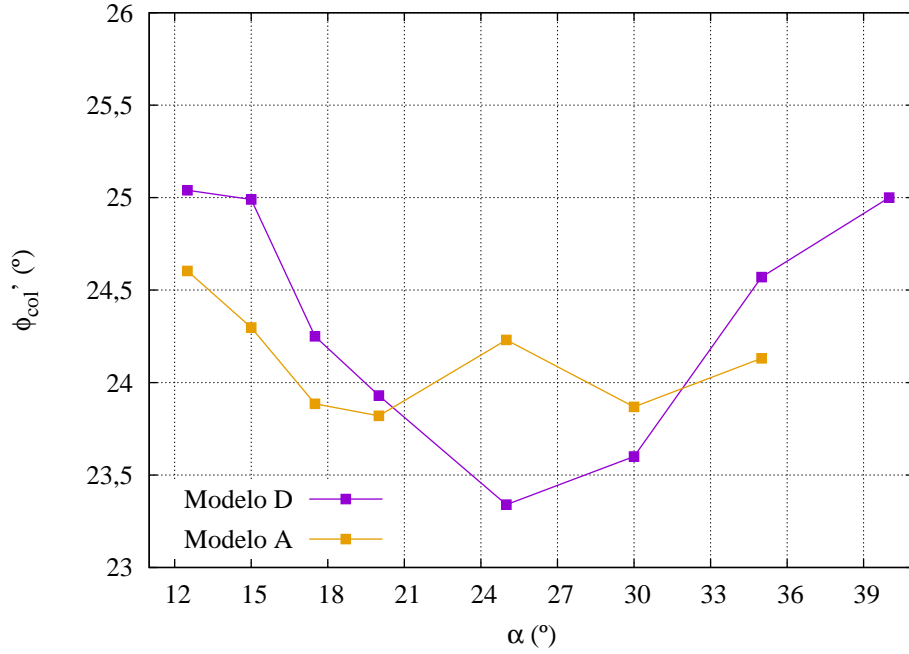


Figura 4.2: Variação do ângulo de resistência ao corte no colapso com a inclinação da ancoragem, para o comprimento livre base de cada modelo

bastante acentuada na evolução da curva de cada caso; ao invés, observamos que ancoragens com inclinações maiores têm uma curva muito mais monótona e horizontal; isto acontece pois o mecanismo deixa de ser o da estabilidade global como observado também na figura 3.13.

Analisando e comparando os valores obtidos, fazendo esta mesma variação de parâmetro mas para o Modelo A, é possível ver pelo gráfico 4.2, que os resultados para o seu caso base, ou seja para um  $L_l$  de 9 m, estão abaixo do  $\phi'_d$  e portanto do lado da segurança. Porém observando este mesmo gráfico é possível perceber que para o Modelo D por vezes este valor de  $\phi'_d$  é excedido. É ainda de notar que enquanto que para o Modelo A a variação de valores no gráfico é relativamente pequena, para o Modelo D esta variação é bastante mais acentuada.

Através da análise da figura 4.3 e no gráfico 4.2, que tem representados os deslocamentos totais para os modelos A e D com um  $\alpha$  que varia entre os 12,5° e os 40°, podemos constatar o seguinte:

- No Modelo D, para valores de  $\alpha$  até 20° observa-se a formação de um mecanismo de rotura global, sendo que depois desse valor existe a formação de uma cunha representando o impulso ativo.
- Para o Modelo A, a partir de um  $\alpha$  de 15° podemos observar que o mecanismo deixa de ser o de rotura global, havendo uma transição para um mecanismo com duas cunhas representativas do impulso ativo e passivo.

- No Modelo D o  $\phi'_{col.}$  decresce com o aumento de  $\alpha$ , até que o mecanismo deixa de ser o de rotura global, a partir daí aumenta.
- Os deslocamentos de maior valor ocorrem no tardo da cortina, nomeadamente no topo da mesma e no fundo da escavação junto à interface solo-estrutura.
- Pelos mecanismos de rotura global de ambos os modelos é possível perceber que a cortina sofre uma rotação.
- À medida que o  $\alpha$  aumenta, para ambos os casos é possível de perceber que os deslocamentos totais também aumentam e os modelos deixam de ter o mecanismo de rotura global, sendo ainda de referir que para  $\alpha$  diminutos existem também deslocamentos relevantes uma vez que a ancoragem fica muito próxima da superfície.

### 4.3 Estudo da influência da posição da cabeça da ancoragem

Para a presente análise paramétrica foi variada a posição da cabeça da ancoragem,  $a$ , sendo que para o modelo considerado como caso base foi considerado um  $a=2$  m. Sempre que se analisou uma nova posição da cabeça da ancoragem, foi calculada uma nova ficha e uma nova força na ancoragem, como indicado na tabela 4.2. Foi variada então a posição da cabeça a 0,5 m, 1,5 m e 2,5 m como se pode observar pela figura 4.4.

Tabela 4.2: Variação da ficha e da força na ancoragem com a posição da cabeça da ancoragem

|       | Modelo<br>A  |       | Modelo<br>D  |       |
|-------|--------------|-------|--------------|-------|
| a (m) | $F_d$ (kN/m) | f (m) | $F_d$ (kN/m) | f (m) |
| 0,5   | 211,00       | 4,10  | 609,63       | 12,29 |
| 1,5   | 230,06       | 4,02  | 635,78       | 12,10 |
| 2     | 240,60       | 3,97  | 649,98       | 11,95 |
| 2,5   | 253,17       | 3,92  | 665,06       | 11,77 |

Primeiramente, observando a tabela 4.2, podemos ver que à medida que a cabeça da ancoragem é colocada a maior profundidade, maior o valor da força na ancoragem e menor o valor da altura enterrada.

Analisando o gráfico 4.4 podemos inferir que a variação do  $\phi'_{col.}$  é muito pequena, cerca de 0,5° a 1° apenas. É de notar que, analisando o gráfico 4.4, ambos os modelos apresentam um andamento similar em termos de curva, sendo que de uma forma quase simétrica. Enquanto para que para o Modelo D, observa-se que para uma posição da cabeça da ancoragem mais perto da superfície obtêm-se valores de  $\phi'_{col.}$  mais elevados, no Modelo A ocorre exatamente o oposto.

Analisando mais atentamente a figura 4.5, podemos apreender que:



### 4.3 Estudo da influência da posição da cabeça da ancoragem

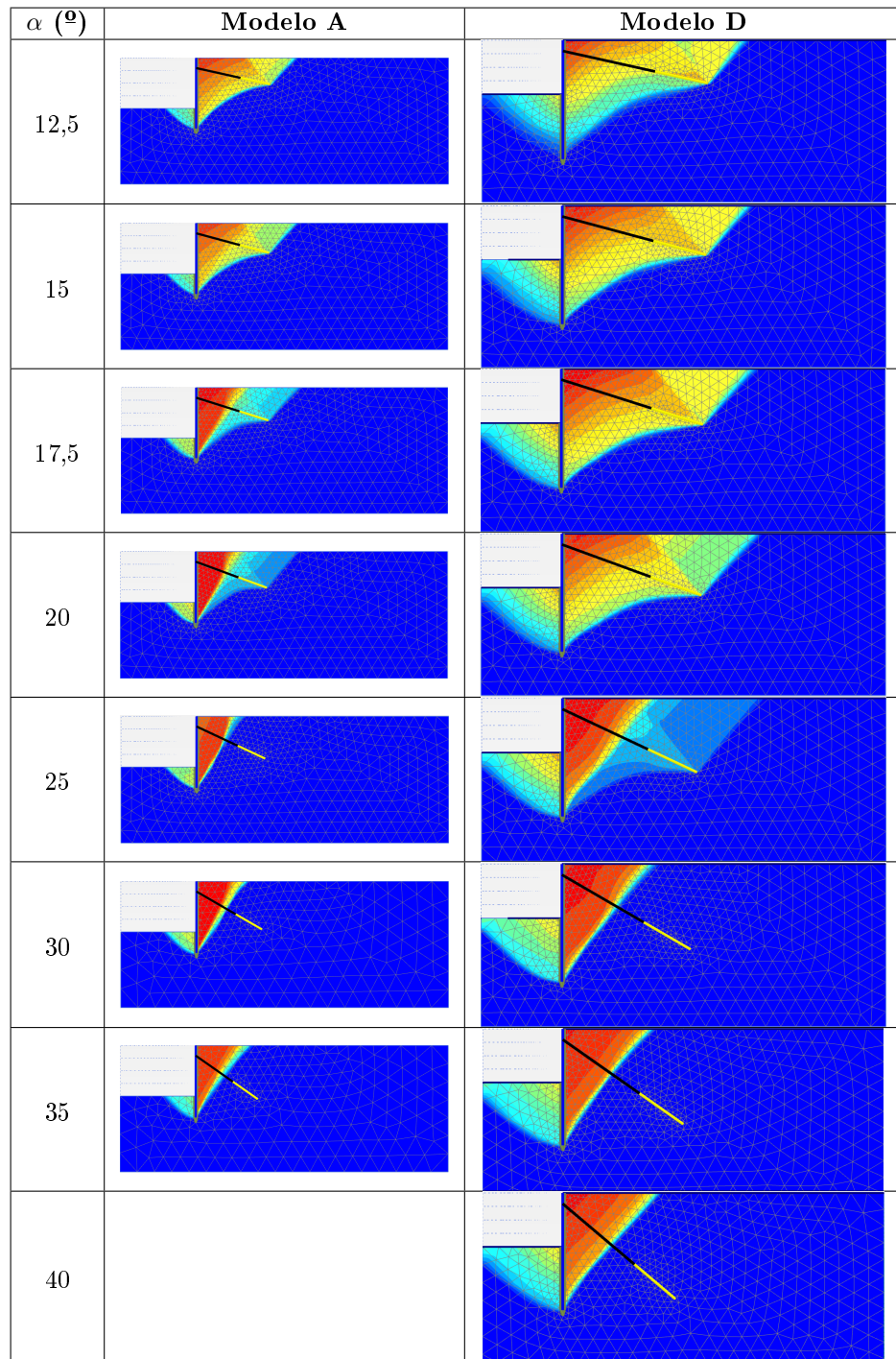


Figura 4.3: Deslocamentos totais obtidos no estudo em que se varia a inclinação da ancoragem, na fase da redução dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$

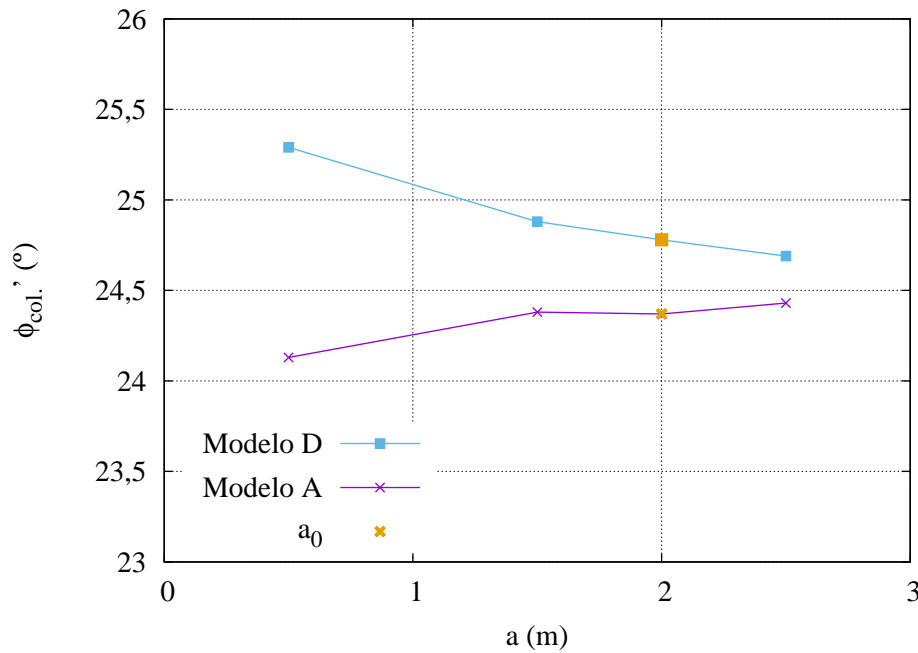


Figura 4.4: Variação do ângulo de resistência ao corte no colapso com a posição da cabeça da ancoragem

- Em ambos os modelos é possível perceber que o mecanismo formado é o de rotura global para todas as posições da cabeça da ancoragem.
- Em todos os casos o mecanismo formado é semelhante, o que explica igualmente a pequena variação de  $\phi'_{col.}$ .
- O Modelo D apresenta deslocamentos elevados numa área pelos menos um pouco mais alargada, sobretudo no fundo da escavação, devido ao elevado comprimento da ficha.

#### 4.4 Estudo da influência do comprimento de selagem

Sendo que foi considerado para o Modelo A, como caso base, um comprimento de selagem,  $L_s$ , de 6 m, e para o Modelo D, um  $L_s$ , de 10 m, fez-se para ambos os modelos uma análise paramétrica para os valores de 3 m, 4 m, 5 m, 6 m, 9 m, 9,5 m, 10,5 m, 13 m e ainda para 16 m.

Os resultados obtidos, da variação do ângulo de resistência ao corte no colapso,  $\phi'_{col.}$ , com o comprimento de selagem,  $L_s$ , estão representados na figura 4.6.

Analisando os resultados na figura 4.6, é possível perceber que enquanto o mecanismo é o de rotura global, o aumento de  $L_s$  implica a diminuição de  $\phi'_{col.}$ . A partir de determinado valor de  $L_s$  o mecanismo deixa de ser o de rotura global. Isso não se vê no Modelo D possivelmente

#### 4.4 Estudo da influência do comprimento de selagem

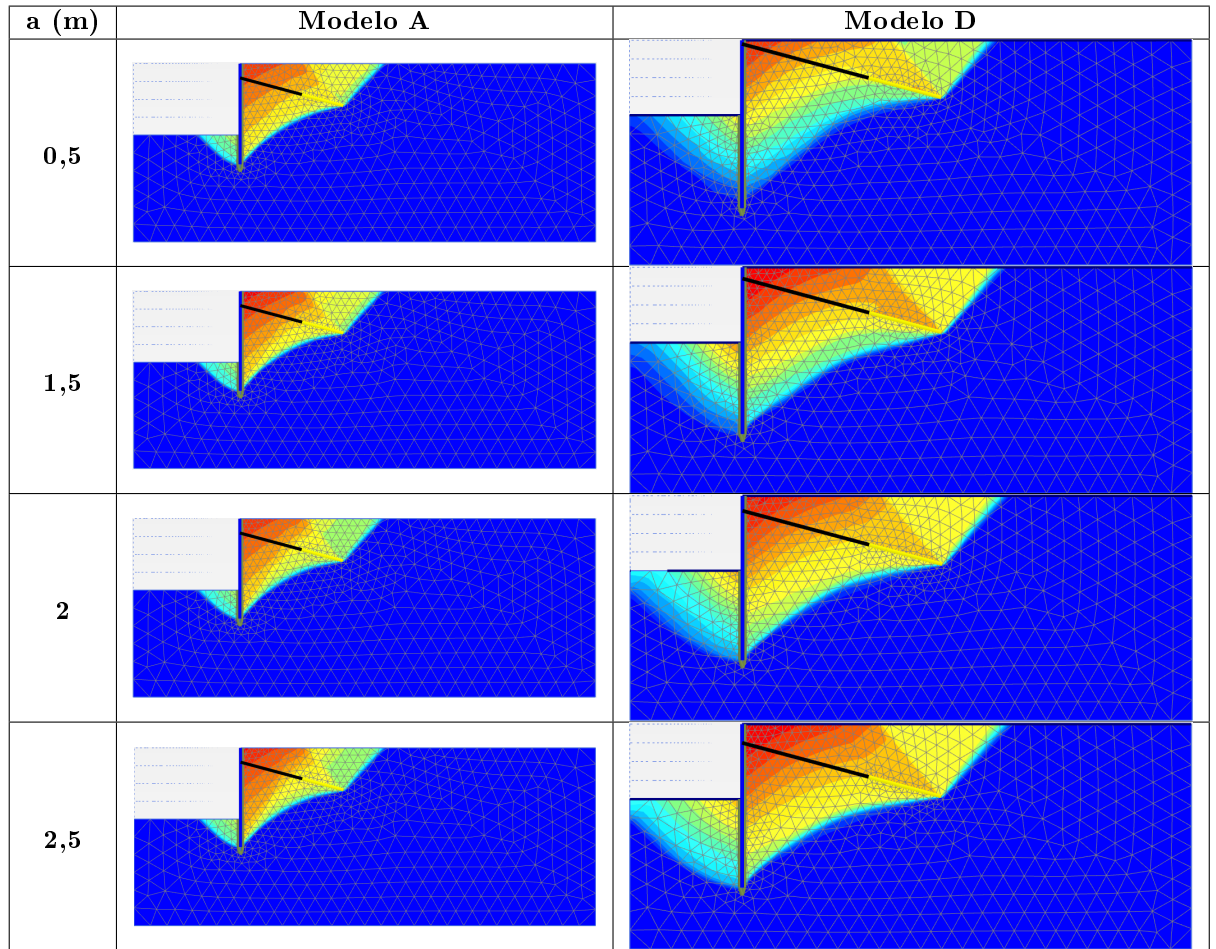


Figura 4.5: Deslocamentos totais, em que se varia a posição da cabeça da ancoragem, na fase da redução dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$

porque não foram experimentados valores de  $L_s$  suficientemente grandes. Contudo, o aspeto do mecanismo do Modelo D, para um  $L_s$  de 16 m, parece indicar que se estava a caminhar para o mesmo comportamento.

Através da análise da figura 4.6 e 4.7, que contém os deslocamentos totais na última fase, podemos constatar o seguinte:

- Para um comprimento de selagem inferior a 9 metros, o Modelo A forma um mecanismo de colapso, envolvendo grande parte do terreno suportado até ao fim do bolbo de selagem, sendo que a nível do  $\phi'_{col.}$  obtém-se valores elevados.
- Ao se comparar os dois modelos em estudo, é visível a diferença entre mecanismos, enquanto que no Modelo A, a partir de um  $L_s$  de 9 metros, vemos uma definição perfeita de duas cunhas representando o impulso ativo e passivo, que em termos de gráfico coincide com o patamar horizontal de  $\phi'_{col.}$ , no Modelo D por outro lado observa-se um mecanismo mais abrangente com deslocamentos superiores no topo da cortina e em alguns casos no tardoz

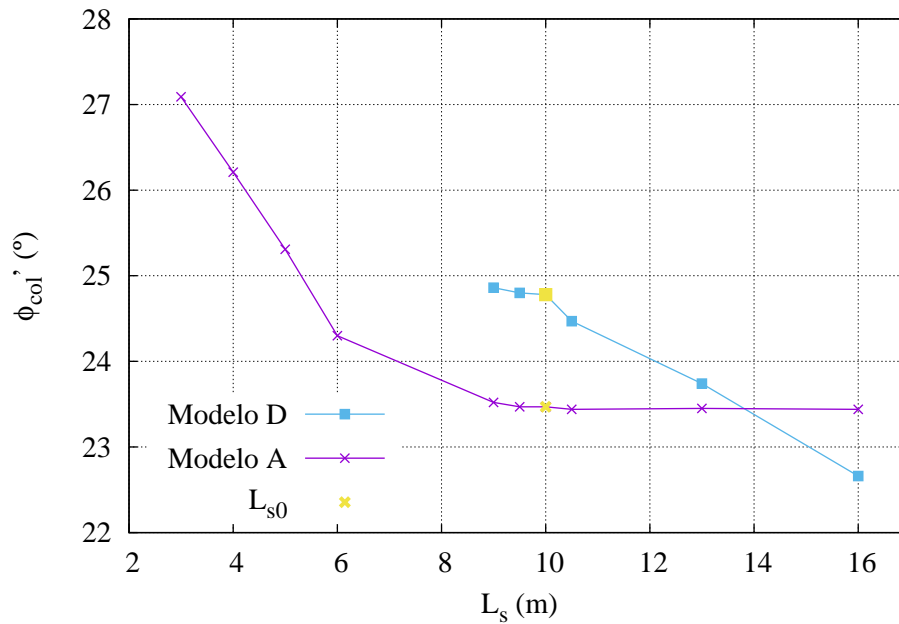


Figura 4.6: Variação do ângulo de resistência ao corte no colapso com o comprimento de selagem

da mesma, ou seja, um mecanismo de rotura global.

- No Modelo D observamos que para todos os  $L_s$  estudados o mecanismo formado é o de rotura global, sendo que para um  $L_s$  de 16 m existe já uma transição de mecanismos, com duas cunhas representativas dos impulsos ativo e passivo a iniciarem a sua formação.

## 4.5 Estudo da influência da altura enterrada da cortina

De seguida será efetuada a variação da ficha do Modelo D. Conforme referido, o valor da ficha adotado para o Modelo D, no que se via anteriormente é o valor de 1,2 vezes o determinado para o Modelo C.

Optou-se portanto para esta análise paramétrica, fazer o cálculo do Modelo D com uma ficha igual ao Modelo C, com uma ficha de valor 1,1 vezes maior que a ficha do Modelo C e ainda uma ficha com mais dois metros que o Modelo D.

Sendo efetuada a redução dos parâmetros  $c'$  e  $\phi'$  obtém-se os gráficos da figura 4.8. Podemos perceber por esta figura que à medida que o valor da ficha aumenta, o  $\phi'_{col}$  diminui. É ainda de reparar que todos os casos atingem um patamar horizontal para certo valor de  $L_l$ .

É ainda de referir que os cálculos apresentados são para um comprimento livre,  $L_l$ , de 17,5 m

#### 4.5 Estudo da influência da altura enterrada da cortina

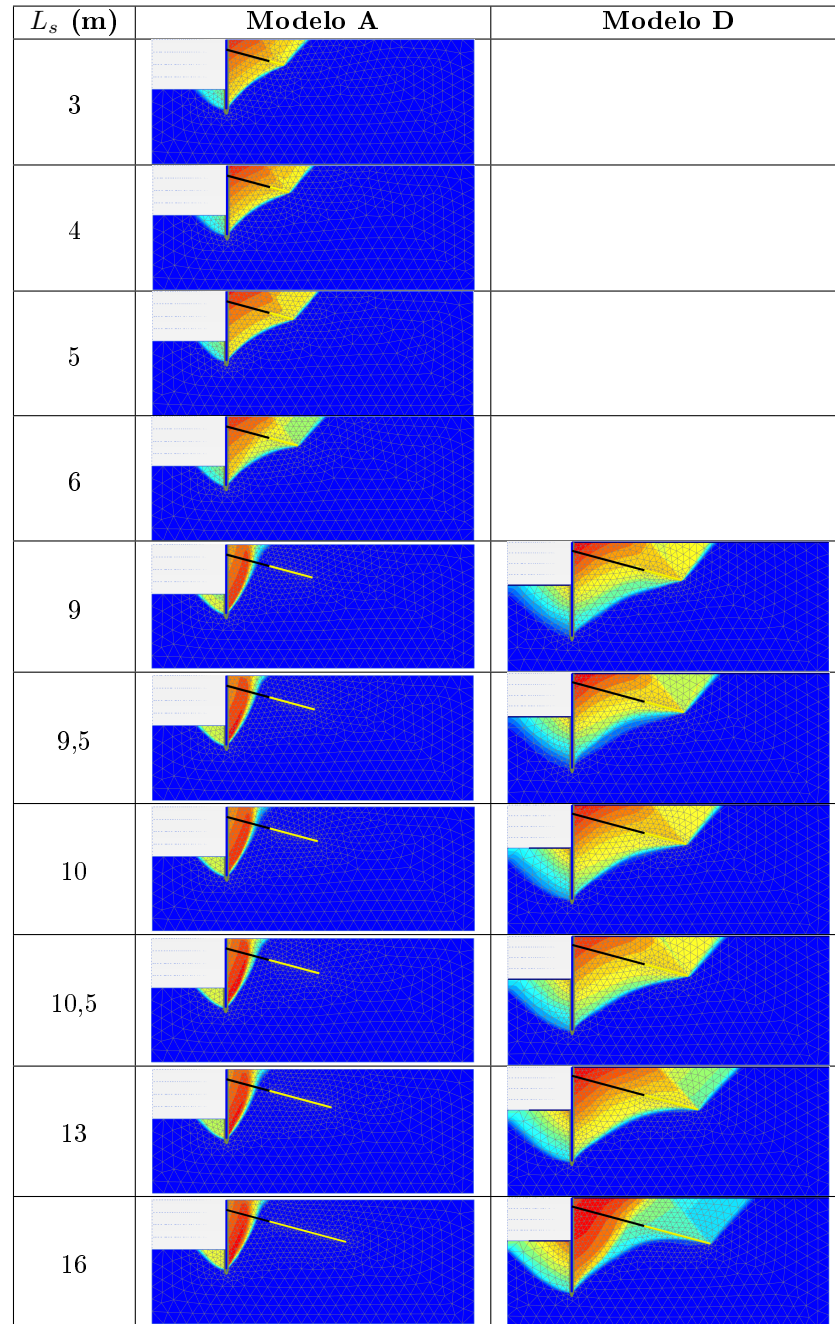


Figura 4.7: Deslocamentos totais obtidos no estudo em que se varia o comprimento de selagem, na fase de redução dos parâmetros  $c'-\phi'$

tal como ilustra a reta vertical do gráfico da figura 4.8.

Analisando a figura 4.9, onde estão representados os deslocamentos totais do Modelo D, podemos constatar que:

- Para um comprimento livre até 20 metros, os três últimos casos apresentam um comportamento semelhante, em que se forma um mecanismo de colapso.



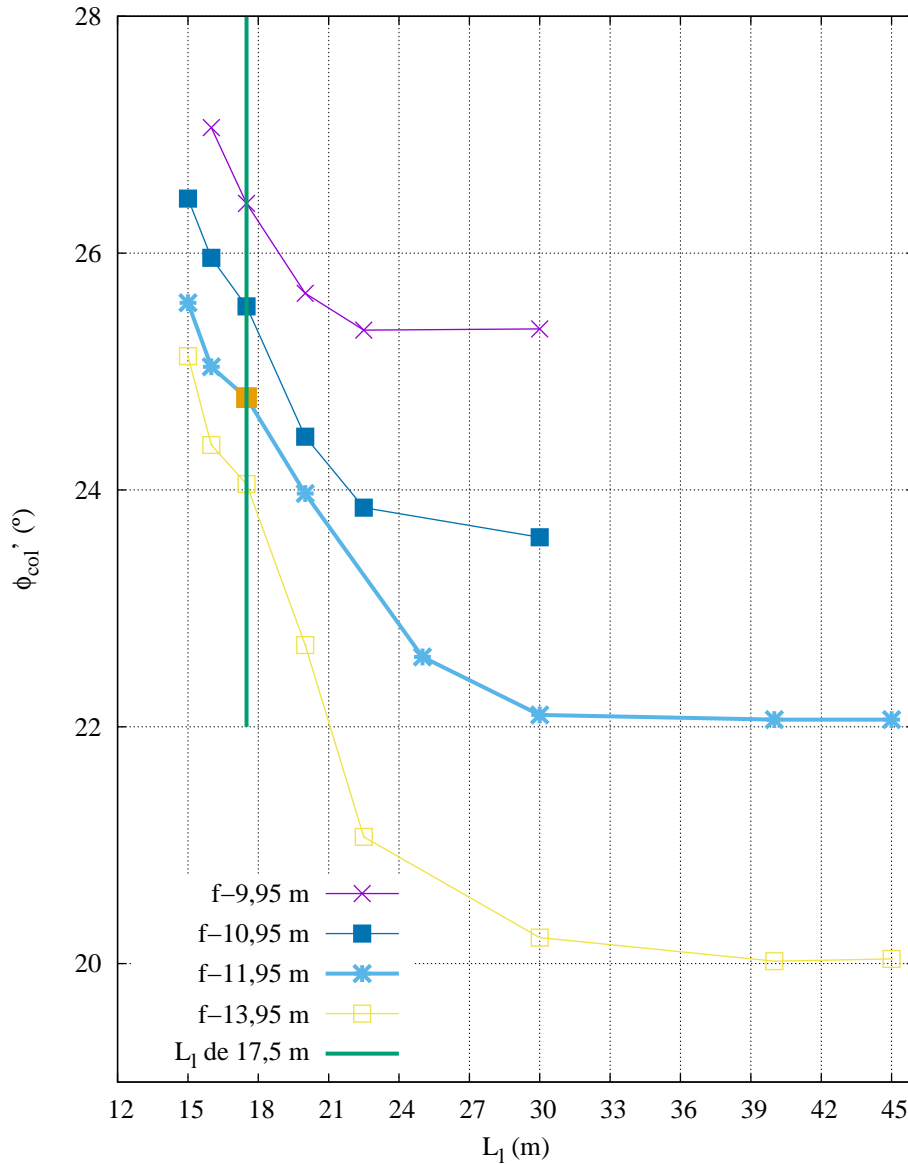


Figura 4.8: Variação do ângulo de resistência ao corte de colapso do Modelo D, com fichas distintas, com o comprimento livre

- O primeiro caso, com uma ficha de 9,95 metros, para um  $L_l$  de 20 metros apresenta um mecanismo de transição, que coincide em termos do gráfico no momento em que se atinge o patamar de  $\phi_{col}'$ , onde já se começam a formar duas cunhas representativas dos impulsos ativo e passivo.
- Nos três primeiros casos, vemos claramente que a partir de um  $L_l$  de 25 metros, já estão formadas as duas cunhas anteriormente referidas.
- Em todos os casos é possível perceber que o patamar horizontal é atingido para um  $L_l$  de

## 4.6 Estudo da influência do ângulo de resistência ao corte

25 ou 20 m, dependendo do caso, e em todos eles corresponde também ao mecanismo que deixa de ser o de rotura global.

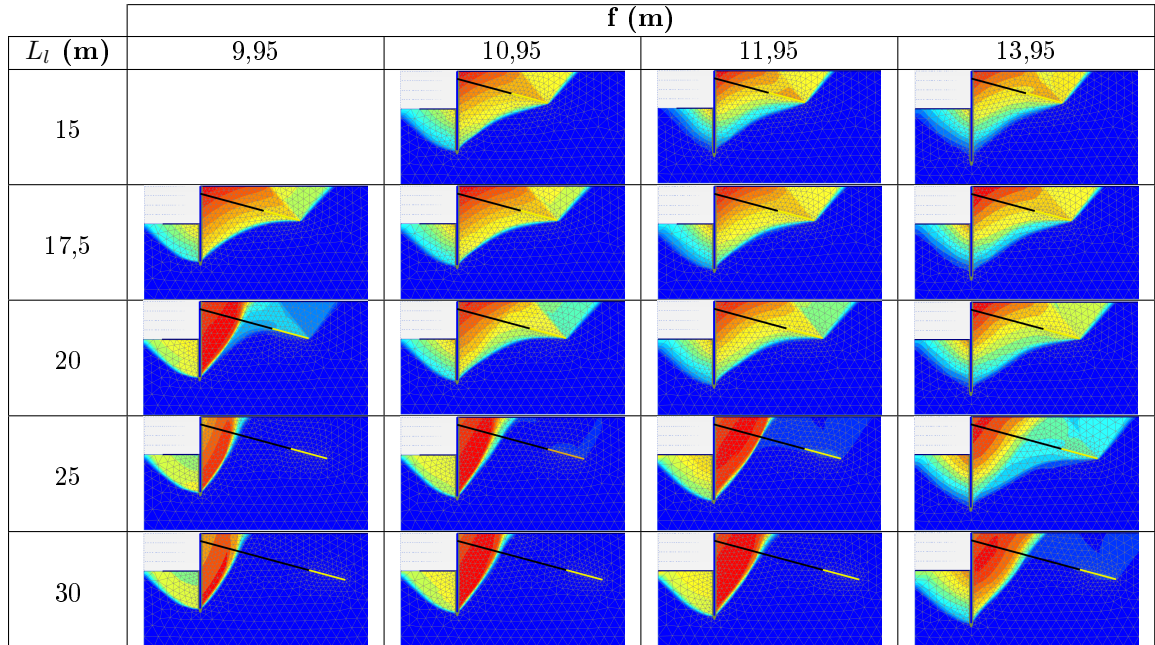


Figura 4.9: Variação do comprimento livre com a altura enterrada, para o Modelo D

## 4.6 Estudo da influência do ângulo de resistência ao corte

Nesta secção são efetuados dois estudos paramétricos do ângulo de resistência ao corte,  $\phi'$ . No primeiro estudo é calculada uma nova ficha de cada modelo à medida em que se altera o  $\phi'$ , o que consequentemente leva a uma alteração também da força na ancoragem. No segundo já é mantido a ficha e apenas se altera o  $\phi'$ . É ainda de referir que para o caso base, os cálculos efetuados usaram um  $\phi'$  de  $30^\circ$ , para o estudo paramétrico foram analisados  $\phi'$  de  $28^\circ$ ,  $35^\circ$  e  $40^\circ$ , para os modelos A e D.

### 4.6.1 Estudo da influência do ângulo de resistência ao corte alterando o valor da ficha

Observando a figura 4.10, que representa a variação do ângulo de resistência ao corte no colapso, com o ângulo de resistência ao corte do solo, sendo alterado o valor da ficha, é possível constatar-se que em ambos os modelos existe um andamento semelhante, em que para um maior  $\phi'$  do solo irá conduzir por sua vez a um maior  $\phi'_{col}$ . O modelo D foi o que revelou ser mais sensível a este estudo paramétrico, uma vez que sofre uma variação em termos  $\phi'_{col}$  muito mais acentuada.

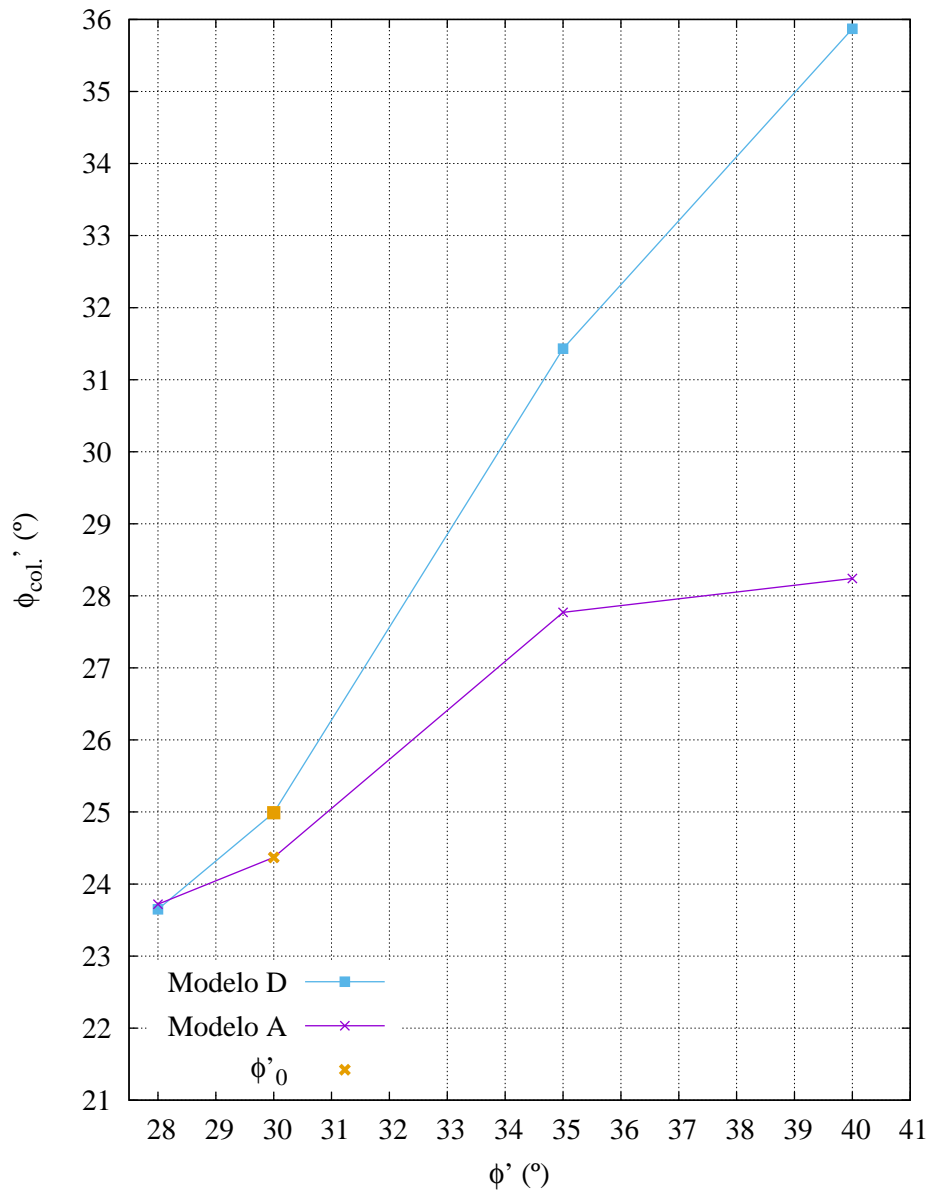


Figura 4.10: Variação do ângulo de resistência ao corte com o ângulo de resistência ao corte do solo- modelos A e D sendo alterado o valor da ficha

A figura 4.11 representa a variação do ângulo de resistência ao corte no colapso com a ficha, considerando as análises paramétricas efetuadas anteriormente, da ficha e do ângulo de resistência ao corte do solo do Modelo D. Nos casos representados na figura relativamente à variação  $\phi'$ , quando muda o ângulo de resistência ao corte, muda a ficha. Logo, seria de esperar que o efeito de mudar a ficha, no colapso, fosse o mesmo, quer por alteração de  $\phi'$ , quer por alteração da ficha (sem mudar  $\phi'$ ). E, de facto, verifica-se. Apesar de uma das curvas abranger valores de  $f$  (e de  $\phi'_{col.}$ ) muito maiores do que a outra, mas na zona em que ambas existem as diferenças não são muito grandes. Uma explicação possível para tais diferenças existirem, é o facto de quando



#### 4.6 Estudo da influência do ângulo de resistência ao corte

se muda  $\phi'$  mudar-se igualmente a força na ancoragem, ao passo que, no caso em que muda simplesmente a ficha, a força na ancoragem é mantida.

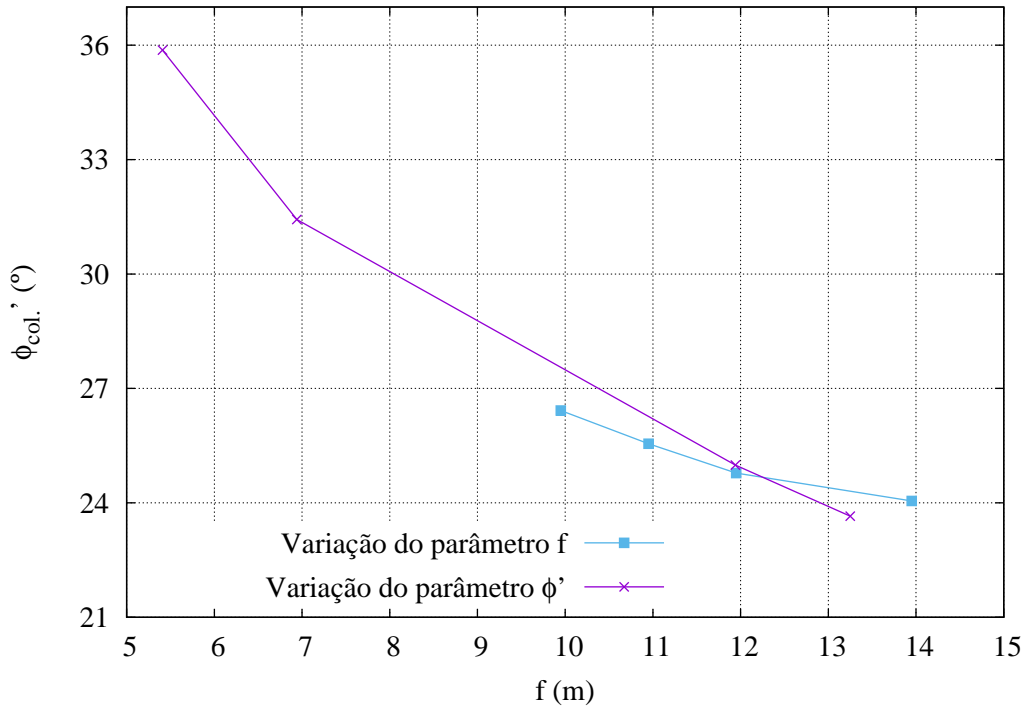


Figura 4.11: Variação do ângulo de resistência ao corte no colapso com a ficha, considerando as análises paramétricas efetuadas da ficha e do ângulo de resistência ao corte do solo do Modelo D

Sendo observada mais atentamente a figura 4.12, que contem os deslocamentos totais obtidos na fase de redução dos parâmetros  $c'$ - $\phi'$  nos cálculos efetuados neste estudo, podemos constatar que:

- A nível dos mecanismos ambos os modelos apresentam semelhantes para um mesmo  $\phi'$ , sendo que até a um  $\phi'$  de  $30^\circ$ , que corresponde a um  $\phi'_{col.}$  mais ou menos igual ao  $\phi'_d$ , vemos um mecanismo a envolver toda a ancoragem e para um  $\phi'$  maior que esse existe a formação de duas cunhas de impulsos, ou seja, um mecanismo que não é o de rotura global.
- É interessante notar ainda que para o Modelo A e D à medida a que o  $\phi'$  aumenta observamos a formação de duas cunhas do lado ativo e passivo.
- Em ambos os modelos para um  $\phi'$  de  $35^\circ$  e  $40^\circ$  já está patente um mecanismo que não é o de rotura global.

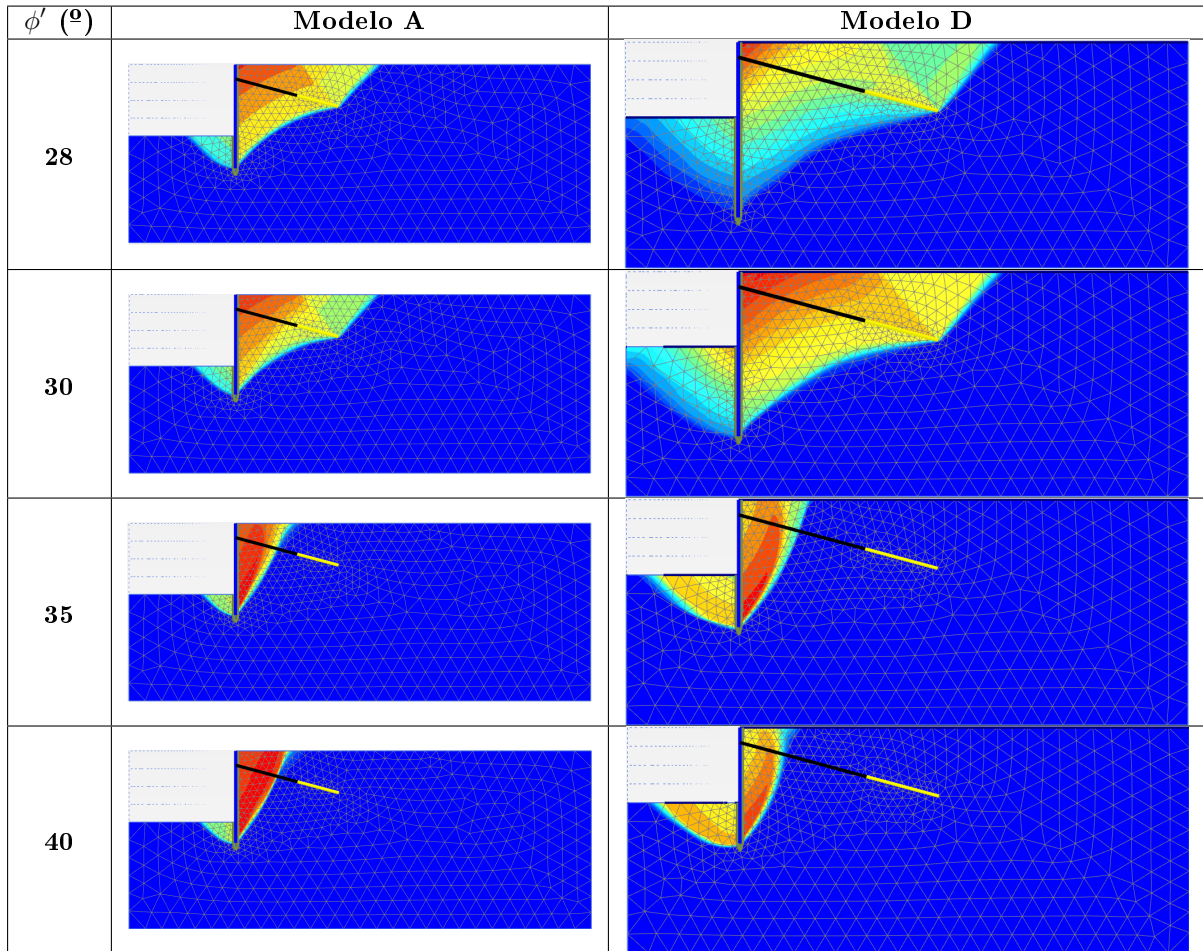


Figura 4.12: Deslocamentos totais obtidos no estudo em que se varia os parâmetros do solo, alterando a ficha, na fase de redução dos parâmetros  $c'$ - $\phi'$

#### 4.6.2 Estudo da influência do ângulo de resistência ao corte mantendo o valor da ficha

Pelo gráfico da figura 4.13 é possível perceber que a variação do ângulo de resistência ao corte do solo, sendo mantido o valor da altura enterrada e da força na ancoragem, não tem uma influência relevante em termos do ângulo de resistência ao corte no colapso que é obtido. As curvas representativas dos modelos A e D apresentam ambas um andamento semelhante, sem grandes alterações de valor, sendo que até são obtidos  $\phi'_{col.}$  bastante similares.

Sendo observada mais atentamente a figura 4.14, que contém os deslocamentos totais obtidos na fase de redução dos parâmetros  $c'$ - $\phi'$  nos cálculos efetuados neste estudo, podemos constatar que:

Em ambos os modelos observamos que o mecanismo formado é o de rotura global, facto que é possível de confirmar com o gráfico também, uma vez que o  $\phi'_{col.}$  mantém-se constante e com

## 4.6 Estudo da influência do ângulo de resistência ao corte

um valor próximo ao  $\phi'_d$ .

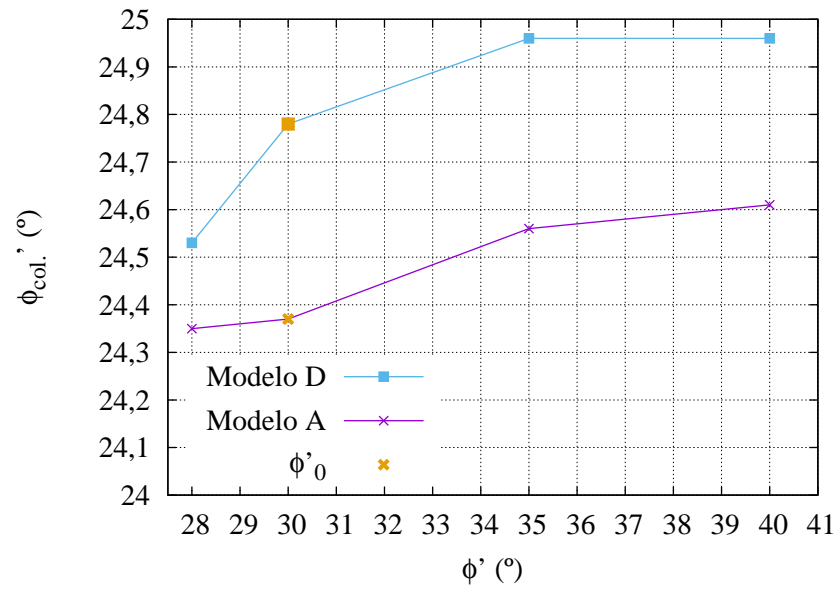


Figura 4.13: Variação do ângulo de resistência ao corte de colapso com o ângulo de resistência ao corte do solo- Modelos A e D mantendo o valor das fichas

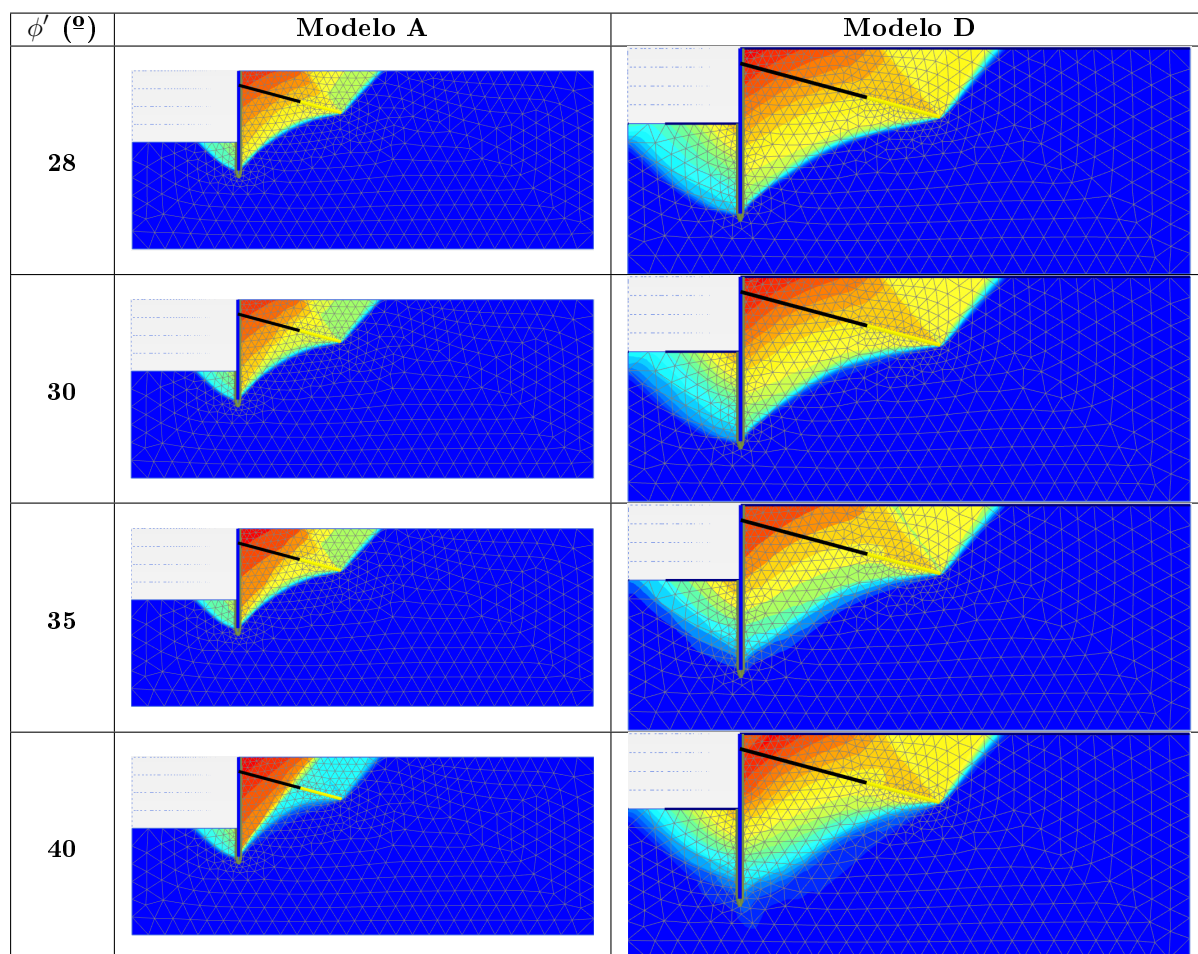


Figura 4.14: Deslocamentos totais obtidos no estudo em que se varia os parâmetros do solo, mantendo o valor da ficha, na fase de redução dos parâmetros  $c'-\phi'$

## Capítulo 5

# Considerações finais

### 5.1 Conclusões

O estudo realizado permite chegar às seguintes conclusões:

- Foi possível com a aproximação proposta por Grabe (2008) calcular um valor para a ficha de uma cortina com percolação, sendo que o valor adotado acabou por se revelar conservativo quando comparando com outros modelos.
- O comprimento livre tem uma influência positiva na estabilidade global das cortinas, uma vez que para todos os modelos estudados, maiores comprimentos livres traduzem-se em ângulos de resistência ao corte no colapso menores.
- Um aumento da ficha traduz-se num aumento da segurança para cortinas com percolação.
- Fichas mais pequenas têm um efeito mais gravoso em termos de estabilidade global.
- Em termos de inclinação da ancoragem, a influência para casos com ou sem percolação é semelhante, o aumento da inclinação é benéfico para a estabilidade global até certo valor, após o mesmo já prejudica a estabilidade da cortina.
- Havendo percolação no modelo, quanto mais perto da superfície estiver a cabeça da ancoragem, mais prejudicial será este parâmetro à estabilidade global da cortina.
- Não existindo nível freático, é mais benéfico a cabeça da ancoragem estar mais perto da superfície.
- No caso de haver percolação no modelo, foi possível perceber que quanto maior for o comprimento de selagem, mais positivo será o efeito do mesmo na estabilidade global da cortina.

- Num caso em que não exista nível freático o comprimento de selagem demonstra ser irrelevante para comprimentos de selagem grandes.
- Em relação ao ângulo de resistência ao corte, para casos em que exista um novo cálculo da altura enterrada do modelo, à medida a que este aumenta, mais prejudicial será o seu efeito nas cortinas com e sem percolação.
- Em relação ao ângulo de resistência ao corte, para casos em que se mantenha a altura enterrada do modelo, este demonstrou ser um fator pouco importante, uma vez que não existe uma alteração significativa da estabilidade global das cortinas com e sem percolação.
- Nas análises paramétricas efetuadas foi possível constatar que existe uma alteração dos mecanismos de rotura global para mecanismos com duas cunhas representativas do impulso ativo e passivo, nomeadamente quando se aumenta os valores do comprimento livre, inclinação da ancoragem, comprimento de selagem, ficha e ângulo de resistência ao corte (alterando o valor da ficha).

## 5.2 Desenvolvimentos futuros

Com a finalidade de contribuir para o seguimento de estudos futuros dentro do tema apresentado no presente trabalho, considera-se que seria pertinente a realização do estudo realizado para um maior número de ancoragens, considerando uma maior diversidade de níveis freáticos existindo percolação, análise do efeito da estratificação do maciço, análise de diferentes espaçamentos verticais entre ancoragens, estudo da existência de sobrecargas à superfície do terreno e também a comparação dos resultados obtidos com o método de Broms.

# Bibliografia

- Frank R., C. Bauduin R. Driscoll M. Kavvadas N. Krebs Ovesen T. Orr B. Schuppener e H. Gulvanessian (2004). *Designer's to EN1997-1 - Eurocode 7: Geotechnical Design - General Rules*. Thomas Telford (obra não consultada diretamente).
- Grabe, J. (2008). "Sheet Piling Handbook Design". Em: *Thyssen Krupp GfT, Bautechnik GmbH HSP HOESCH. Spundwand and Profil GmbH, Hamburg*.
- Guerra, N. M. d. C. (2003). *Estruturas de suporte*. Mestrado em Geotecnia para Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Josefino C. M. d. S.; Guerra, N. M. d. C.; Antão A. M. S. N. (2014). "Reapreciação dos métodos de Kranz e de Broms aplicados a cortinas mono-apoiadas: Resultados preliminares". Em: *14 Congresso Nacional de Geotecnia*. Ed. por Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Lancelotta, R. (2002). "Analytical solution of passive earth pressure". Em: *Geotechnique* 52 (8), 617-618.
- NP EN 1997-1 (2010). *Eurocódigo 7, Projecto Geotécnico, Parte 1: Regras Gerais*. Rel. téc. CT115, Instituto Português da Qualidade.
- Plaxis (2014). *Plaxis 2D Manual*.